

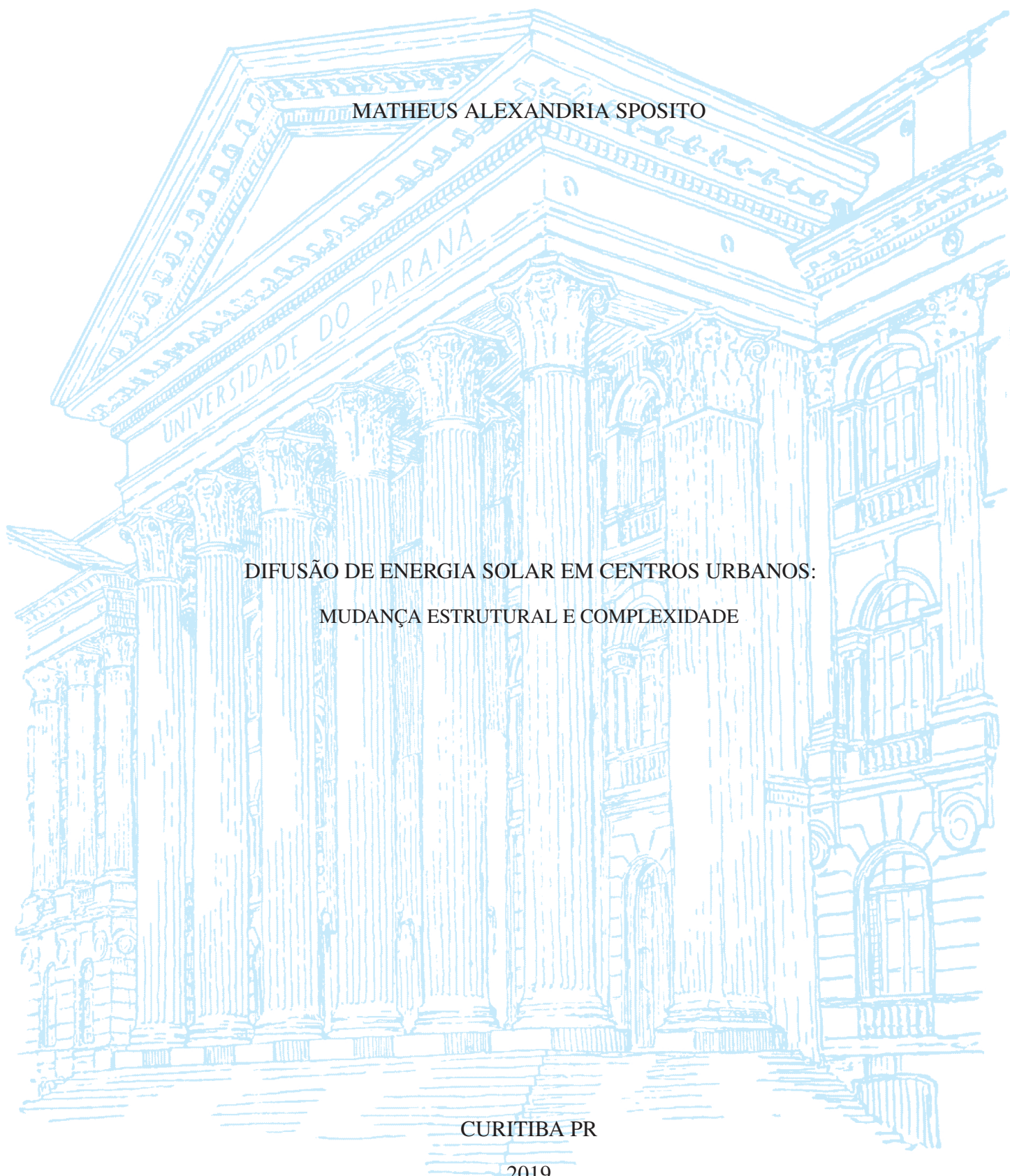
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MATHEUS ALEXANDRIA SPOSITO

DIFUSÃO DE ENERGIA SOLAR EM CENTROS URBANOS:
MUDANÇA ESTRUTURAL E COMPLEXIDADE

CURITIBA PR

2019



MATHEUS ALEXANDRIA SPOSITO

DIFUSÃO DE ENERGIA SOLAR EM CENTROS URBANOS:

MUDANÇA ESTRUTURAL E COMPLEXIDADE

Trabalho apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Desenvolvimento Econômico, no Curso de Pós-Graduação em Desenvolvimento Econômico, Setor de Ciências Sociais Aplicadas, da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. João Basílio Pereima Neto.

CURITIBA PR

2019

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA DE CIÊNCIAS SOCIAIS
APLICADAS – SIBI/UFPR COM DADOS FORNECIDOS PELO(A) AUTOR(A)
Bibliotecário: Mara Sueli Wellner – CRB 9/922

Sposito, Matheus Alexandria

Difusão de energia solar em centros urbanos: mudança estrutural e complexidade / Matheus Alexandria Sposito. – 2019.
102 p.

Orientador: João Basílio Pereima Neto.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Sociais Aplicadas, Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Econômico.

Defesa: Curitiba, 2019.

1. Energia solar – Aspectos econômicos. 2. Energia solar – Difusão tecnológica. 3. Energia solar - Cidades. I. Pareima Neto, João Basílio, 1963- II. Universidade Federal do Paraná. Setor de Ciências Sociais Aplicadas. Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Econômico. III. Título.

CDD 333.7923


TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **MATHEUS ALEXANDRIA SPOSITO**, intitulada: **DIFUSÃO DE ENERGIA SOLAR EM CENTROS URBANOS: MUDANÇA ESTRUTURAL E COMPLEXIDADE**, após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.


A outorga do título de Mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 21 de Fevereiro de 2019.


JOÃO BASÍLIO PEREIMA NETO
Presidente da Banca Examinadora


ADRIANA SBICCA FERNANDES
Avaliador Interno (UFPR)


CLODOMIRO UNSIHUAY-VILA
Avaliador Externo (UFPR)


ELOI RUFATO JÚNIOR
Avaliador Externo (COPEL)

AGRADECIMENTOS

Inicialmente, agradeço ao sistema público de ensino do Brasil, que no momento da escrita dessa dissertação sofre inúmeros ataques, mas que sem sombra de dúvidas é um dos maiores instrumentos de transformação social desse país.

Agradeço aos meus pais Deusdeditt Rodrigues Sposito e Maria Aparecida Batista Sposito, por todo o amor, carinho e conselhos que me deram durante essa jornada.

Ao meu irmão Thiago Alexandria Sposito, por sempre me inspirar com o seu vasto conhecimento e humanidade.

Ao meu orientador João Basílio Pereima Neto, pela liberdade durante todo o processo.

A todos os meus amigos, que de maneira direta ou indireta, foram sempre um grande pilar, em especial ao Rafael Bambirra Pereira pelas nossas reuniões, sempre com muita boa vontade.

Ao SIMEPAR, por disponibilizar os dados utilizados nessa dissertação.

E se eu consegui trilhar esse caminho, com toda a certeza, é porque tive grandes pessoas na minha vida!

RESUMO

A geração descentralizada de energia solar tornou-se uma das grandes alternativas energéticas para o mundo e está em seus estágios iniciais de disseminação, como uma nova tecnologia disruptiva, com efeitos sobre o desenvolvimento econômico e a organização dos centros urbanos, gerando mudanças que atingem a forma de organização do mercado de energia, a dinâmica das cidades e o comportamento das famílias que passam a se comportar simultaneamente como consumidores e produtores de energia. Atualmente, existem poucos modelos descentralizados de difusão de geração solar e muitos dos modelos atuais se concentram em alguns aspectos como: comportamento do consumidor, estabilidade da rede física ou minimização de perdas. Projetou-se nessa dissertação um modelo de difusão tecnológica para superar as limitações existentes lançando mão de um modelo de simulações baseadas em agentes que cria uma cidade de topologia hipotética que integra várias camadas e adiciona variáveis micro e macroeconômicas que são importantes para uma compreensão sistêmica do problema. As contribuições incluem: a) difusão espacialmente que depende da distribuição topológica residencial de um centro urbano; b) interação social das famílias que interferem na decisão individual do investimento; c) a função de investimento micro financiado pelas famílias; d) integração entre a rede elétrica e decisões econômicas; e) formação de preços endógenos; e finalmente f) Avaliações de políticas públicas de mercado, tais como subsídios, preços mínimos e investimentos. Os resultados obtidos pela simulação apresentaram no modelo proposto que a heterogeneidade de renda entre os bairros podem ser um empecilho para a difusão dos painéis. Além de avaliar que diferentes políticas, preços e subsídios têm impactos na adoção dessa nova tecnologia.

Palavras-chave: Difusão Tecnológica, Sistemas Complexos, Modelo Baseado em Agente, Energia Solar, Geração Distribuída.

ABSTRACT

Decentralized generation of solar power has become one of the great energy alternatives for the world and it is in its initial stages of dissemination as a new disruptive technology, with diverse effects on the economic development and the organization of the urban centers, generating structural changes that reach the energy market organization form, the urban centers dynamics and the familie's behavior which have a simultaneous role as consumer/producer. Currently, there are few decentralized solar generation diffusion models and many of the current models focus on some specific aspects including: consumer behavior, physical network stability, and loss minimization. We designed a technological diffusion model to overcome the existing limitations based on long-term agents in a city of hypothetical topology that integrates several layers and adds several micro and macroeconomic variables that are important for a systemic understanding of the problem. Relevant contributions include: a) Spatially localized diffusion that depends on the topological distribution of residences in an urban center; b) social interaction of families which interferes with the individual investment decision; c) the micro-funded investment function of families and system operators allowing aggregation of the dynamics of public and private investments); d) integration between the physical network (IEEE 33 standard) and economic decisions; e) endogenous price formation; and finally f) Market public policy evaluations, such as subsidies, minimum prices and investments. The results obtained by the simulation presented in the proposed model that the heterogeneity of income among the neighborhoods may be an obstacle to the diffusion of the panels. Besides evaluating that different policies, prices and subsidies have impacts on the adoption of this new technology.

Keywords: Technological Diffusion, Solar Energy, Distributed Generation, Complex Systems, Agent-Based Model.

LISTA DE FIGURAS

2.1	Mapa Fotovoltaico Brasileiro, Mapa Fotovoltaico do Estado do Paraná e Mapa Fotovoltaico da Europa	19
2.2	Categoria de Adotantes	24
2.3	Curva de Adoção	25
3.1	Representação das 32 Regiões do Modelo	33
3.2	Representação Gráfica da Cidade Simulada	33
3.3	Representação Gráfica da Cidade Simulada com Difusão Tecnologia	35
3.4	Carga Média das Famílias que Consomem menos de 100 kWh/mês	39
3.5	Carga Média das Famílias que Consomem entre 101 e 200 kWh/mês	39
3.6	Carga Média das Famílias que Consomem entre 201 e 300 kWh/mês	40
3.7	Carga Média das Famílias que Consomem entre 301 a 500 kWh/mês	40
3.8	Carga Média das Famílias com o Consumo maior que 500 kWh/mês	41
3.9	Diagrama do Alimentador de Distribuição IEEE 33 Barras	48
3.10	Diagrama Simplificado para Fluxo de Potência.	49
3.11	Fluxograma	52
4.1	Variação dos Parâmetros γ_1 e γ_2 que geram 6 Laços Sociais.	55
4.2	Total de Adotantes da Simulação Base	56
4.3	Porcentagem de Adotantes por Classe Social da Simulação Base	57
4.4	ROI médio por Classe Social da Simulação Base	58
4.5	Evolução dos preços da Tarifa de Energia da Simulação Base	59
4.6	Evolução da Capacidade Instalada Total da Simulação Base.	60
4.7	Evolução da Carga e Geração Distribuída da Simulação Base	60
4.8	Evolução do Investimento das Famílias da Simulação Base	61
4.9	Evolução da Geração Distribuída e Carga dos Dias Representativos.	62
4.10	Tensão Máxima Mensal do Sistema	63
4.11	Tensão Mínima Mensal do Sistema.	63
4.12	Evolução das Perdas do Sistema	64
4.13	Variação dos Parâmetros γ_1 e γ_2 que geram 4 Laços Sociais.	65
4.14	Variação dos Parâmetros γ_1 e γ_2 que geram 8 Laços Sociais.	66
4.15	Percentual de Adotantes das Simulações com Diferentes Quantidades de Laços Sociais.	67
4.16	Capacidade Instalada nas Simulações com Diferentes Quantidades de Laços Sociais.	68

4.17	Total do Investimento das Famílias nas Simulações com Diferentes Quantidades de Laços Sociais	68
4.18	Percentual de Adotantes para Diferentes Perfis de Adoção de Inovação	70
4.19	O Impacto de β_0 na Quantidade Final de Adotantes	71
4.20	O Impacto de β_0 na Capacidade Total Instalada	72
4.21	Tensão Máxima do Sistema Reconfigurado.	73
4.22	Tensão Mínima do Sistema Reconfigurado	73
4.23	Perdas do Sistema Reconfigurado.	74
4.24	Evolução do Percentual de Adotantes para Diferentes Taxas de Juros	75
4.25	Resultado Final dos Adotantes para Diferentes taxas de Juros	76
4.26	Resultado Final dos Adotantes da Classe A para Diferentes taxas de Juros	77
4.27	Resultado Final dos Adotantes da Classe B para Diferentes taxas de Juros	77
4.28	Resultado Final dos Adotantes da Classe C para Diferentes taxas de Juros	78
4.29	Resultado Final dos Adotantes da Classe D para Diferentes taxas de Juros	78
4.30	Resultado Final dos Adotantes da Classe E para Diferentes taxas de Juros	79
4.31	Evolução do Percentual de Adotantes para Diferentes Alíquotas de ICMS	80
4.32	Resultado Final dos Adotantes para Diferentes Alíquotas de ICMS	80
4.33	Evolução do Percentual de Adotantes para Diferentes Taxas de Subsídios.	81
4.34	Resultado Final dos Adotantes para Diferentes Taxas de Subsídios	82
4.35	Resultado Final dos Adotantes da Classe A para Diferentes Taxas de Subsídios .	83
4.36	Resultado Final dos Adotantes da Classe B para Diferentes Taxas de Subsídios. .	83
4.37	Resultado Final dos Adotantes da Classe C para Diferentes Taxas de Subsídios. .	84
4.38	Resultado Final dos Adotantes da Classe D para Diferentes Taxas de Subsídios .	84
4.39	Resultado Final dos Adotantes da Classe E para Diferentes Taxas de Subsídios. .	85
4.40	Evolução do Percentual de Adotantes para Diferentes Preços de Venda	86
4.41	Resultado Final dos adotantes para para Diferentes Preços de Venda	86
4.42	Capacidade Total Instalada para Diferentes Preços de Venda	87
4.43	Percentual de Adotantes para Diferentes Tarifas de Energia	88
4.44	Capacidade Instalada para Diferentes Tarifas de Energia.	89
4.45	Investimento Total das Famílias para Diferentes Tarifas de Energia	89

LISTA DE TABELAS

2.1	Empreendimentos em Operação	17
3.1	Preço da Energia no Paraná por kWh	36
3.2	Alíquotas de Impostos	37
3.3	Classes Sociais	38
3.4	Renda das Famílias	38
3.5	Preço dos Sistemas Fotovoltaicos no Brasil por kilowatt-Pico Instalado	45
3.6	Relação de Parâmetros para os Tipos de Bfarra	50
4.1	Parâmetros da Simulação Base	54
4.2	Distribuição de Renda e Ligação na Rede Elétrica de cada Região do Modelo	55
4.3	Diferentes Perfis de Adoção da Sociedade	69
4.4	Distribuição de Renda e Ligação na Rede Elétrica de cada Região do Modelo	72
A.1	Apêndice 1 - Temperatura Média Horária de Curitiba com Base nos Dodos de Janeiro de 2012 a Dezembro de 2017.	98
A.2	Apêndice 2 - Desvio Padrão da Temperatura Horária de Curitiba com Base nos Dodos de Janeiro de 2012 a Dezembro de 2017	99
A.3	Apêndice 3 - Irradiação Média Horária de Curitiba, com Base nos Dodos de Janeiro de 2012 a Dezembro de 2017.	100
A.4	Apêndice 4 - Desvio Padrão da Irradiação Horária de Curitiba com Base nos Dodos de Janeiro de 2012 a Dezembro de 2017	100
B.1	Apêndice 5 - Dados das Barras	101
B.2	Apêndice 6 - Dados das linhas	102

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	OBJETIVO GERAL	13
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
1.3	JUSTIFICATIVA	14
1.4	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	15
2	REVISÃO DA LITERATURA	16
2.1	SETOR ELÉTRICO	16
2.1.1	Contextualização da Energia Fotovoltaica no Mundo	17
2.1.2	Energia Fotovoltaica no Brasil	18
2.1.3	Aspetos regulatórios da energia Fotovoltaica no Brasil.	19
2.2	INOVAÇÃO TECNOLÓGICA E DIFUSÃO	22
2.3	INTERDEPENDÊNCIA DO CONSUMO	25
2.4	REDES SOCAIS	26
2.5	MODELOS BASEADOS EM AGENTES	27
2.5.1	Modelos para o Setor de Energia	29
2.5.2	Modelos de Difusão de sistemas fotovoltaicos	30
3	O MODELO	32
3.1	AMBIENTE.	32
3.2	TEMPO	34
3.3	AGENTES	34
3.4	PREÇO DA ENERGIA	35
3.5	O CONSUMO DE ENERGIA PELAS FAMÍLIAS E A RENDA	37
3.6	GERAÇÃO	41
3.7	REGRAS DE COMPORTAMENTO.	43
3.7.1	Tomada de decisão	43
3.7.2	Retorno sobre o Investimento.	45
3.7.3	Laços Sociais	46
3.7.4	Renda	47
3.7.5	Perfil.	47
3.8	REDE ELÉTRICA	48
3.8.1	Fluxo de potência	49
3.8.2	Fluxograma do Processo de Difusão	52

4	SIMULAÇÃO E RESULTADOS	54
4.1	SIMULAÇÃO BASE	55
4.2	SIMULAÇÕES DE SENSIBILIDADE DO MODELO	65
4.2.1	Resposta do Modelo ao Número de Laços Sociais	65
4.2.2	Resposta do Modelo a outros Perfis de Adoção de Tecnologia	69
4.2.3	Resposta do Modelo a Diferentes β_0	70
4.2.4	Resposta do Modelo a outra configuração da rede elétrica	72
4.3	APLICAÇÃO DE POLÍTICAS PÚBLICAS	74
4.3.1	Taxa de Juros	75
4.3.2	Variações no ICMS da Tarifa de Energia	79
4.3.3	Subsídios no Preço do Sistema Fotovoltaico	81
4.3.4	Fixar o Valor do Preço de Venda da Energia Solar Gerada Pelas Residências	85
4.3.5	Diferentes Tipos de Tarifas Energia.	87
5	CONCLUSÃO	90
5.1	TRABALHOS FUTUROS	90
	REFERÊNCIAS	92
	APÊNDICE A – DADOS CLIMATOLÓGICOS	98
A.1	TEMPERATURA.	98
A.2	IRRADIAÇÃO	100
	APÊNDICE B – DADOS DO SISTEMA ELÉTRICO	101
B.1	DADOS DAS BARRAS	101
B.2	DADOS DAS LINHAS	102

1 INTRODUÇÃO

O avanço tecnológico na geração de energia solar através do uso de painéis fotovoltaicos chegou a um limiar que pode iniciar mudanças estruturais no modelo energético dos países e cidades. A queda dos custos e o aumento das capacidades de geração das células com outras inovações em equipamentos de consumo, quando combinadas, podem levar a sociedade a entrar em regimes de abundância de energia (Diamandis e Kotler, 2012) ou ao menos sustentar altos padrões de uso de energia sem pressionar recursos ambientais e, adicionalmente, reduzir as emissões de CO_2 através da substituição de usinas baseadas em combustíveis fósseis.

Além disso, os combustíveis fósseis são encontrados de forma limitada na natureza e nem todos os países têm reservas naturais destas fontes de energia, o que podem os tornar susceptíveis a choques exógenos nos preços e afetar até mesmo os seus abastecimentos internos. Nesse cenário surgiu uma preocupação de muitas nações em desvincular da matriz energética convencional e se aprofundar em fontes renováveis de energia.

Uma forma encontrada para resolver esse problema é a utilização de energia gerada a partir de recursos renováveis, ao invés das fontes convencionais. No caso do Brasil 60,76% da sua matriz energética em 2017 era oriunda de fontes hídricas, fonte também dita como renovável (ANEEL, 2017). Como volume pluviométrico segue tendências sazonais, em algumas épocas do ano os reservatórios podem ficar abaixo do necessário. Desta forma para garantir a oferta de energia muitas vezes é preciso acionar as termelétricas, o que pode aumentar expressivamente os custos da energia além de gerar poluição com a emissão de gases na queima do combustível.

Outro problema associado as hidrelétricas são os limitantes geográficos, as barragens precisam ser construídas em áreas que possibilitem o alagamento de grandes extensões de terra para criação dos reservatórios, o que normalmente ocorre em regiões que não são próximas dos centros urbanos ou dos polos industriais aos quais elas devem abastecer. Necessitando assim de altos custos da transmissão dessa energia até o seu destino, além existir um grande impacto ambiental no alagamento dessas regiões.

Desta forma a energia solar torna-se ainda mais atrativa. Se destacando como uma das mais promissoras uma vez que a irradiação solar é limpa, livre, de baixíssimos custos ambientais, menos sujeita a restrição de localização, além da vantagem de ser possível gerá-la de forma distribuída ao longo do sistema elétrico, reduzindo assim os custos de transmissão. Devido ao aumento da demanda de energia, a necessidade de diversificação da matriz energética e as preocupações ambientais o crescimento do número de fontes de geração distribuída se faz evidente em todo o mundo (Leão et al., 2011).

A energia solar que incide sobre a superfície terrestre é superior, cerca de 10.000 vezes a demanda bruta da energia atual da humanidade. Entretanto, sua baixa densidade (energia/área) e sua variação temporal são os grandes desafios técnicos para o seu aproveitamento em larga escala. Na busca do aproveitamento direto dessa energia, diversas tecnologias vêm sendo estudadas, com destaque para a conversão fotovoltaica e conversão térmica (Menezes et al., 2018).

No Brasil, o primeiro passo nessa direção foi a Resolução Normativa ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) nº 482/2012, que permite ao consumidor brasileiro gerar sua própria energia elétrica a partir de fontes renováveis ou cogeração qualificada. A integração de fontes de geração distribuída no sistema elétrico, impõe custos e benefícios aos participantes do mercado de energia.

Dentre os microssistemas de geração de energia elétrica, microgeração distribuída, a energia fotovoltaica é a que mais vem sendo discutida e testada, devido à sua maior facilidade de

instalação e mais simples operação e manutenção (Cabello e Pompermayer, 2013). A contínua redução de preço dos painéis fotovoltaicos no mercado internacional, principal insumo destes sistemas, também tem propiciado a disseminação desta fonte alternativa.

Com as perspectivas de crescimento e desenvolvimento da energia fotovoltaica muitos governos vêm dando incentivos para estimular à concretização destes sistemas tanto na escala residencial quanto na industrial. Ao mesmo tempo, porém, os governos têm que se preocupar como a capacidade da rede de distribuição suportar essa nova tecnologia.

Devido ao custo elevado e a natureza periódica e intermitente da energia solar, uma vez que só há produção durante o dia, o aumento excessivo da capacidade de geração de energia solar através da implementação de sistemas fotovoltaicos dentro de um curto período, sem desenvolver os componentes de armazenamento e redes robustas (melhoria da capacidade de distribuição - escoamento - de energia), pode aumentar o preço da energia drasticamente e ameaçar a estabilidade dos sistemas de transmissão e distribuição. Portanto, as políticas governamentais precisam ser ajustadas de forma adequada para o bom crescimento da indústria solar junto das demais partes dessa cadeia produtiva para evitar os gargalos apresentados acima.

Na literatura Palmer et al. (2015) e Zhao et al. (2011), implementaram MBA (Modelos Baseados em Agentes), modelos de simulação computacional os quais as decisões são tomadas de forma descentralizada pelos indivíduos, para simular a difusão de sistemas fotovoltaicos. Diferente dos modelos já existentes, o modelo proposto nessa dissertação considera o impacto gerado na rede elétrica e considera ainda as características socio-espaciais para criar efeitos de heterogeneidade entre os agentes considerando os feitos dentro dos limites urbanos de uma cidade simulada.

A difusão da geração de energia solar descentralizada é tipicamente um sistema complexo, devido às suas interações com várias dimensões da realidade, incluindo economia e mercados, estabilidade das redes elétricas, comportamento dos indivíduos, organização dos centros urbanos e o meio ambiente. Outra fonte de complexidade advém dos aspectos microeconômicos através da interação das famílias nas redes sociais que afetam suas decisões de investimento, e dessa forma a velocidade do processo de difusão, aspectos microfísicos determinados pela necessidade de estabilizar a geração e a distribuição em uma rede com vários (milhares) de nós descentralizados de geração.

Atualmente, com o avanço do processamento computacional tornou-se viável analisar sistemas utilizando modelos computacionais mais detalhados com múltiplas interações. Com isso, o modelo proposto nessa dissertação segue um quadro híbrido abrangente e altamente detalhado (em três níveis) à base de simulação, que permite avaliações do desenvolvimento do uso da energia solar como fonte de energia elétrica. Os três níveis são dependentes entre si, uma vez que o resultado de um afeta nos demais, criando assim uma dinâmica não equilibrada do sistema.

No nível superior, foram definidas funções que estabeleceram a dinâmica do preço da energia elétrica no modelo, o preço é um resultado que depende da quantidade de produtores de energia em relação à demanda dentro do sistema.

No nível intermediário, utilizou-se o sistema IEEE 33 barras, que representa um sistema de distribuição de energia, com uma barra de referência que alimenta o sistema garantindo que ele se mantenha equilibrado e outras 32 barras que representam pontos de carga ou geração e as barras são conectadas por linhas de distribuição. Esse sistema será utilizado para simular a distribuição de energia elétrica de uma cidade hipotética, a partir de parâmetros previamente definidos em relação ao comportamento de carga e geração. O método de Newton-Raphson é utilizado para calcular o fluxo de potência e avaliar o comportamento das grandezas elétricas e

das perdas do sistema em um horizonte horário de interações, de acordo com as configurações de inserção de geração distribuída. Esses aspectos são abordados mais a fundo do capítulo 3.

No nível dos micro-fundamentos, foi implementado técnicas baseadas em agentes e sistema de dinâmicas de simulação para definir a heurística em relação à adoção de sistemas fotovoltaicos por diferentes famílias, considerando, principalmente, (1) o retorno sobre o investimento, (2) propensão ao consumo de novas tecnologias (3) o nível de riqueza do agregado familiar, e (4) a influência da comunicação com outros agentes. Para a estimativa do retorno sobre investimento, o modelo considera os custos de cada família ao implementarem os sistemas fotovoltaicos, o preço da energia no momento da decisão, e com isso é possível calcular o retorno esperado para o período de 20 anos, uma vez que autores como Benedito (2009) e Jannuzzi et al. (2009) apontam esse como sendo a vida útil desta tecnologia. A propensão ao consumo de novas tecnologias segue a divisão apresentada por Rogers e Shoemaker (1971) que será melhor detalhada no capítulo 2. O nível da riqueza familiar está associada com as condições econômicas específicas da região onde a família está localizada, desta forma, os indivíduos apresentam similaridades dentro de uma mesma localidade. Finalmente, a influência da comunicação é medida pelo número de ligações com outras famílias que já adotaram o sistema fotovoltaico em relação ao total de indivíduos com os quais os agentes se relacionam.

Basicamente o modelo simula a decisão de diferentes famílias interagindo entre si para entender o processo de difusão dos sistemas fotovoltaicos e o impacto que a evolução dessa adoção tem dentro da rede elétrica de uma cidade estilizada.

A difusão da tecnologia de geração de energia solar descentralizada abre oportunidades para o crescimento econômico, traz mudanças estruturais virtuosas que, além de mudar as matrizes energéticas, pode promover uma melhor distribuição de renda ao nível pessoal. Permitindo que as famílias vendam energia no sistema e promova mudanças estruturais ambientalmente sustentáveis, bem como a realoca a mão-de-obra para um setor produtivo mais verde. Para lidar com um sistema tão complexo, desenvolveu-se neste trabalho um modelo baseado em agentes que integra importantes características microeconômicas e microfísicas e pode conceber diferentes padrões emergentes de desenvolvimento econômico e urbano que podem ajudar a entender de forma integrada algumas partes desse quebra-cabeça.

O modelo é descrito com mais detalhes no capítulo 3, contendo vários componentes e camadas que permite analisar alguns dos aspectos importantes que foram discutidos nesta introdução. Os desenvolvimentos futuros do modelo podem incorporar outros aspectos importantes, como os efeitos de mudanças na estrutura do mercado de trabalho, para citar um exemplo. O modelo é baseado em uma topologia urbana hipotética de uma cidade com 32 bairros de igual tamanho e densidade populacional, diferenciados apenas pelo nível de renda per capita. As famílias que moram nesses bairros estão expostas às decisões mensais sobre como investir seus próprios recursos e ingressar na geração de energia para a rede. Uma das principais contribuições teóricas desse modelo é o algoritmo desenvolvido para integrar uma rede física baseada no padrão IEEE 33 barras e as decisões econômicas tomadas pelos agentes do mercado. O modelo pode então ser usado para analisar e prever várias avaliações microeconômicas, macroeconômicas e de políticas públicas, como ficará mais claro no capítulo 4.

1.1 OBJETIVO GERAL

Esta dissertação tem por objetivo simular o processo de difusão tecnológica dentro de uma cidade estilizada dividida em 32 regiões com diferentes faixas de renda e avaliar a disseminação dos sistemas fotovoltaicos residenciais e os possíveis impactos gerados na rede elétrica, causados pela geração distribuída.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos do trabalho consistem em:

- a) Integração teórica dos conceitos de difusão tecnológica, imersão social, redes sociais e MBA;
- b) construção do modelo utilizando de MBA e o sistema IEEE 33 barras para a construção das redes elétricas;
- c) análise de sensibilidade dos parâmetros;
- d) experimentos de simulação utilizando o MBA;
- e) análise de políticas públicas.

1.3 JUSTIFICATIVA

Na literatura econômica muito se discute sobre o processo da difusão de novas tecnologias na sociedade, além do papel das inovações no sistema econômico. Nesta dissertação são apresentadas literaturas sobre disseminação tecnológica e interdependência do consumo para entender o processo das redes sociais na tomada de decisão do consumidor e como isso pode afetar a difusão dos sistemas fotovoltaicos.

O debate sobre a implementação de geração distribuída está crescendo, autores como Jannuzzi (2005), Jannuzzi et al. (2009) e também Benedito (2009) debatem o tema a respeito da geração distribuída e dos seus impactos na sociedade. Estes trabalhos discutem as possíveis políticas públicas e seus impactos na disseminação de tecnologias ligadas ao setor de energia mais precisamente em micro geração distribuída. Em Virgilio et al. (2009), analisa-se o processo da disseminação dos sistemas fotovoltaicos em Portugal em relação à Alemanha e os principais marcos legais dos dois países. No Brasil, o marco legal que institui este processo é a Normativa ANEEL nº 482/2012 que institui normas gerais sobre a implementação, fornecimento, regulamentação e distribuição da geração distribuída no país (MIRANDA, 2012). De modo geral, este debate ainda não é amplamente consolidado na economia, os custos envolvidos na transição da matriz energética por uma descentralizada e renovável ainda tem muito o que ser estudado, os impactos do incentivo público, os determinantes do processo de disseminação, os possíveis desdobramentos na transmissão, entre muitos outros fatores.

Desta forma, esta dissertação tem como objetivo principal contribuir para uma maior discussão sobre o assunto, ao apresentar os resultados simulados por um modelo baseado em agentes que analisará diversos cenários de políticas públicas e traz como avanço frente a literatura do tema como, por exemplo, análise ao nível urbano (analisando as diferenças entre as diferentes regiões de uma cidade) e seus impactos na rede de distribuição elétrica. Além de integrar teorias sobre difusão tecnológica e consumo interdependente com modelos de simulação baseados em agentes, o que pode corroborar com os formuladores de políticas públicas para que os mesmos tenham mais instrumentos para auxiliar na tomada de decisão.

Além disso, as distribuidoras devem manter a tensão fornecida ao cliente de forma a se situar entre 95% e 105% do seu valor nominal, e os indicadores individuais de continuidade dentro do aceitável (ANEEL, 2010); a inserção de geração distribuída no sistema de média e baixa tensão pode causar complicações nos aspectos de qualidade da concessionária, estabelecidos pela ANEEL. Os níveis de tensão podem extrapolar o estabelecido caso ocorra um excesso de geração em um momento de baixa carga, uma vez que a geração solar é intermitente. Um sistema com

pouca capacidade de escoamento de energia ou armazenamento é mais susceptível a sobrecarga. Da mesma forma pode pico de carga e baixa geração, e caso isso ocorra é demandado tempo da concessionária para solucionar o problema o que pode acarretar multas e custos de melhoria da rede. Com a aplicação deste modelo e a análise do impacto na rede pode-se aplicar algoritmos já consolidados na literatura para a reconfiguração da rede elétrica podendo antecipar soluções para as concessionárias mapeando os possíveis investimentos e calculando os seus custos.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação estrutura-se em 5 capítulos complementados por um conjunto apêndices.

O primeiro capítulo consiste na introdução da presente dissertação onde se inclui o enquadramento do tema a tratar, definindo-se também os seus objetivos, a justificativa e descrição da estrutura.

No segundo capítulo, apresenta-se a revisão da literatura acerca dos temas abordados descrevendo vários estudos a respeito do atual panorama da energia solar fotovoltaica no mundo, incentivos ao seu desenvolvimento, contextualização do Brasil e seus aspectos regulatórios. Além disso, abordam-se teóricos dos quais o modelo se estabelecerá. Temas de inovação tecnologia, interdependência do consumo, redes sociais e Modelos Baseados em Agentes são outros assuntos que permeiam o capítulo da revisão da literatura.

O terceiro capítulo destina-se à apresentação do modelo proposto nessa dissertação, com base na literatura analisada no mesmo, construiu-se um modelo baseado na interação das famílias dentro de um ambiente urbano para analisar a difusão de sistemas fotovoltaicos e o seu impacto em uma rede elétrica estilizada.

Para o quarto capítulo, foi reservado a apresentação das simulações. Será apresentado o modelo que servirá como base para as análises, além de testes de robustez e sensibilidade. Ainda nesse capítulo, serão apresentados diferentes cenários de políticas públicas e os possíveis resultados que elas podem exercer sobre as simulações.

No quinto capítulo, apresentam-se as conclusões do projeto e as propostas de projetos futuros que são abertas com esse novo modelo proposto, notadamente são realizadas considerações finais a respeito da formulação de políticas públicas.

Esta dissertação termina com uma seção de apêndices, onde podem ser consultados dados que complementares que foram utilizados na construção do modelo.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo são abordados os principais temas e os arcabouços teóricos que deram base para a construção do modelo apresentado no Capítulo 3. Inicialmente, exploram-se os aspectos do setor elétrico com destaque para o panorama atual do Brasil, analisando os desdobramentos da energia fotovoltaica no país, com base no sistema regulatório brasileiro. Na sequência são apresentados alguns autores que dentro da literatura econômica elucidam o tema da inovação tecnológica e o processo de difusão. Além disso, para entender o indivíduo e suas interações com a sociedade na realização das ações econômicas, são apresentados ferramentais teóricos que trabalham com esses conceitos, uma vez que será proposto um modelo que lida com a interação entre os agentes e será necessário lidar com a estrutura de interação dos indivíduos na sociedade para analisar a dinâmica emergente deste processo. Por isso, uma das seções desse capítulo apresenta a literatura de Redes Sociais e a sua modelagem. Por fim, será apresentado uma série de modelos baseados em agentes que consideram um ou mais desses aspectos na sua construção. Dessa forma, delimitou-se a base teórica do modelo que será apresentado.

2.1 SETOR ELÉTRICO

A energia elétrica é um insumo essencial à sociedade, indispensável ao desenvolvimento socioeconômico das nações. No Brasil, a principal fonte de geração é a hidrelétrica, que responde por 65,2% da capacidade instalada em operação no país, seguida das termelétricas (gás natural, carvão mineral, combustíveis fósseis, biomassa e nuclear), com 27,9%. E os 6,9% restantes são provenientes de usinas eólicas e solares (ANEEL, 2017).

As geradoras produzem a energia, as transmissoras a transportam do ponto de geração até os centros consumidores, de onde as distribuidoras a levam até a casa dos cidadãos. Há ainda as comercializadoras, empresas autorizadas a comprar e vender energia para os consumidores livres (geralmente consumidores que precisam de maior quantidade de energia).

O sistema elétrico brasileiro permite o intercâmbio da energia produzida em todas as regiões, exceto nos sistemas isolados, localizados principalmente na região norte. O trânsito da energia é possível graças ao Sistema Interligado Nacional (SIN), uma grande rede de transmissão com mais de 100 mil quilômetros (km) de extensão. As localidades do sistema isolado vêm sendo gradativamente interligadas ao longo dos anos, hoje somente cerca de 2% do mercado nacional permanece no sistema isolado.

Tabela 2.1: Empreendimentos em Operação

Tipo	Q^[1]	P^[2] Outorgada (kW)	P Fiscalizada (kW)	%^[3]
CG ^[4] Hidrelétrica	694	696.564	696.378	0,43
CG Undi-elétrica ^[5]	1	50	50	0
CG Eólica	591	14.610.089	14.564.193	8,94
PC ^[6] Hidrelétrica	429	5.203.029	5.169.880	3,17
CG Solar Fotovoltaica	2.448	1.920.779	1.906.779	1,17
Usina Hidrelétrica	215	101.879.778	98.248.011	60,27
Usina Termelétrica	3.006	42.064.366	40.426.227	24,8
Usina Termonuclear	2	1.990.000	1.990.000	1,22
Total	7.386	163.001.518	163.001.518	100

Elaboração própria baseado nos dados disponibilizados pela ANEEL (2019).

(1) Quantidade.

(2) Potência.

(3) Os valores de porcentagem são referentes a Potência Fiscalizada.

(4) Central Geradora.

(5) Usina de ondas do mar.

(6) Pequena Central.

Como pode ser visto na Tabela 2.1, o Brasil possui no total 7.386 empreendimentos de geração de energia em operação, totalizando 163.001.518 kW de potência instalada. Está prevista para os próximos anos uma adição de 19.524.482 kW na capacidade de geração do país, proveniente dos 172 empreendimentos atualmente em construção e mais 408 empreendimentos com construção não iniciada. Além disso, existem no país 2.448 usinas de geração solar, com uma capacidade instalada de 1 920 779 kW, o que representa do total da 1,17% da capacidade instalada nacional. O Brasil enfrenta gargalos na implementação dos sistemas fotovoltaicos tanto em escala industrial como em escala residencial, uma vez que grande parte dos componentes não são produzidos nacionalmente o que eleva significativamente o preço criando assim uma resistência a adoção dessa tecnologia (ANEEL, 2019).

2.1.1 Contextualização da Energia Fotovoltaica no Mundo

Países desenvolvidos como a Alemanha, a Itália, o Japão, a Espanha e os Estados Unidos, promoveram programas para incentivar a utilização dos sistemas fotovoltaicos, e em 2011 corresponderam juntos a 88% da potência total instalada no mundo, que no mesmo ano foi aproximadamente 35 mil MW, somente a Alemanha detinha 50%. Esses programas se basearam principalmente na descentralização da produção de energia, ou seja, os sistemas fotovoltaicos instalados por pessoas físicas eram interligados à rede. Assim, toda energia produzida era automaticamente comprada pela companhia de energia (Machado e Miranda, 2014).

Na Alemanha, além dessa medida, o programa de incentivo visava beneficiar o pequeno produtor através do sistema de preços chamado de tarifa-prêmio (*feed-in tariff*). Esse sistema de preços considera que a energia produzida de forma renovável é mais cara que a disponível na rede pública, e, portanto, o pequeno produtor recebe a diferença por produzir essa energia, tornando a energia produzida pelas famílias mais cara que a consumida na rede pelas mesmas (Hagfeldt et al., 2010).

Segundo a Birol et al. (2017) energias renováveis representarão dois terços do investimento no mundo em usinas de geração de energia até o ano de 2040, tornando-se, para muitos países, a fonte de energia com o menor custo de geração. Esta mudança contará com um ganho de importância da solar fotovoltaica, liderada por países como a China e Índia, que possibilitarão que a energia solar seja a maior fonte geradora de energia com baixas emissões de carbono até o

ano de 2040, quando a participação de todas as energias renováveis chegará a 40% do total de energia produzida no planeta.

Segundo projeções da Birol et al. (2017), na União Europeia, após 2030, as energias renováveis irão responder por 80% da capacidade de produção de eletricidade, sendo a energia eólica a principal fonte de produção de eletricidade logo após o ano de 2030. O crescimento das energias renováveis não se limita apenas ao setor elétrico, o uso direto de energias renováveis para fornecer calor e mobilidade irá aumentar de igual modo em todo o mundo. No Brasil, a participação do uso direto e indireto de fontes renováveis no consumo final de energia aumentará de 39% em 2017 para 45% em 2040, em comparação com uma progressão da produção global de energia de 9% para 16% durante o mesmo período.

No trabalho de (Yue et al., 2014), foi utilizado a fabricação de equipamentos fotovoltaicos à base de silício nos Estados Unidos para criar uma análise comparativa de perfis de energia e ciclo de vida dos equipamentos, observou-se que, atualmente, a maioria dos módulos fotovoltaicos são terceirizados ou fabricados em outros países como por exemplo a China.

(Hong et al., 2015) destaca que em 2013 a Coreia do Sul, encontrava-se como sendo o 9º país com o maior consumo de energia e em 2011, ocupou o 7º lugar no ranking dos países com maiores taxas de emissões de gases de efeito estufa. Paralelamente, em 2008, a nação estabeleceu em seu plano nacional de desenvolvimento a meta de "Crescimento de Baixo Carbono Verde" que tem como objetivo desenvolver o setor da indústria fotovoltaica e reduzir drasticamente a emissão de gases da queima de combustível fóssil.

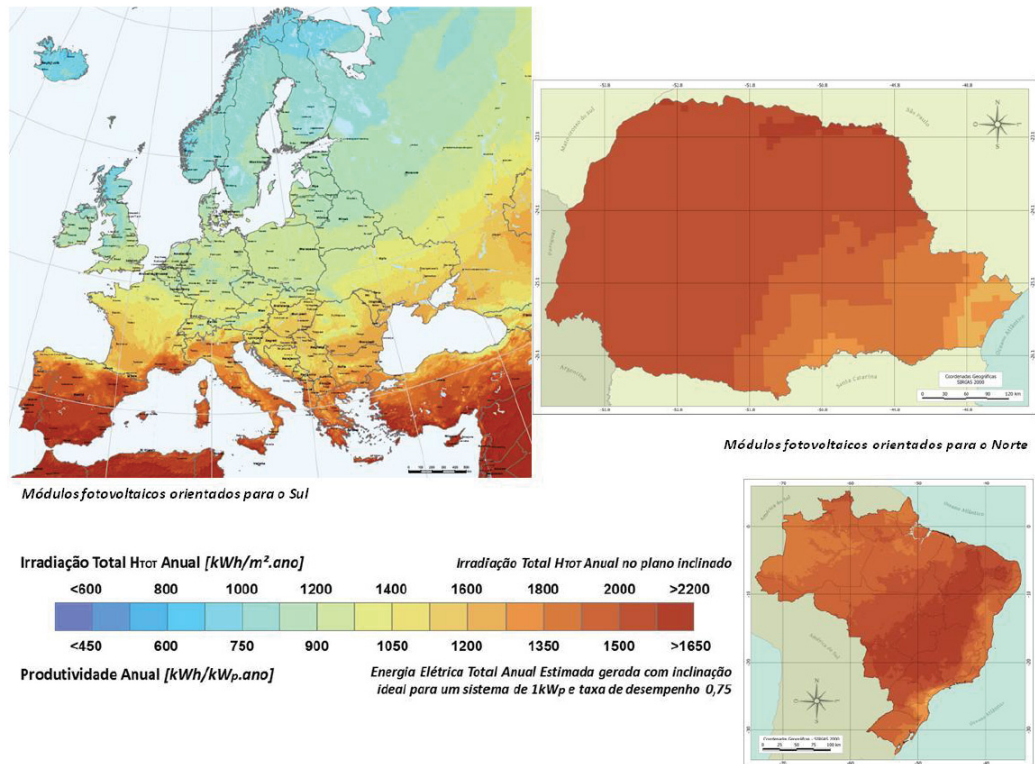
Já Singh e Banerjee (2016), em seu trabalho traçam potenciais cenários de produção de energia fotovoltaica em grande escala, para telhados da cidade de Mumbai, na Índia. Para isso os pesquisadores analisaram uma série de diferentes tecnológicas relativas a produção de energia solar e as diferentes taxas de retorno.

Atualmente, a coordenação dos sistemas de produção de energia eólica e fotovoltaica, com dispositivos eficientes de armazenamento de energia, permite flexibilidade de armazenamento e descarga nas horas de preços de mercado convenientes, a falta de incerteza devido às especificidades de produção de eletricidade de base eólica e fotovoltaica, pode ser gerida por dispositivos de armazenamento (Gomes et al., 2017).

2.1.2 Energia Fotovoltaica no Brasil

O Brasil tem um enorme potencial de aproveitamento da energia solar. Esse aproveitamento no território brasileiro pode ser vantajoso do ponto de vista econômico. Como pode ser visto na Figura 2.1, o país recebe mais irradiação solar do que a maioria dos países da Europa, uma representação do potencial do Brasil em relação a parte dos líderes do seguimento.

Figura 2.1: Mapa Fotovoltaico Brasileiro, Mapa Fotovoltaico do Estado do Paraná e Mapa Fotovoltaico da Europa



Fonte: (Tiepolo et al., 2016).

O estado do Paraná no Brasil, apresenta um potencial fotovoltaico elevado, comparável aos melhores potenciais encontrados na Europa, com valores de Irradiação e Produtividade Total Anual Média de 1.986 kWh/m².ano e 1.490 kWh/kWp.ano como pode ser visualizado na Figura 2.1.

De acordo Menezes et al. (2018), apesar de crescente, o uso da energia solar como energia renovável ainda é subutilizada no Brasil. Ainda se faz necessária a divulgação, políticas de incentivo e aprofundamento da técnica para que a tecnologia seja bem mais aproveitada. Dentro da relevância do tema, este artigo apresenta como objetivo principal avaliar o nível de informação sobre o uso da energia solar e sua utilização no Brasil.

A energia solar pode ser assim considerada, uma importante alternativa para superação dos desafios de expansão de energia elétrica para localidades isoladas, especificamente no meio rural, no qual a rede convencional geralmente não possui acesso, principalmente considerando que o Brasil é um país beneficiado pela larga radiação solar durante o ano (Cabral e Vieira, 2012).

Segundo a ANEEL (2017), dentro do setor residencial que é o foco dessa dissertação, o gasto familiar com energia elétrica representa 46% em média do consumo de energia das famílias. Isso dentro do orçamento familiar é representativo dentre as classes mais baixas, e por isso é importante que o Estado junto ao setor privado viabilizem alternativas como a geração fotovoltaica domiciliar o que pode reduzir drasticamente o custo de vida das famílias.

2.1.3 Aspectos regulatórios da energia Fotovoltaica no Brasil

No Brasil, existe uma autarquia de regime especial, vinculada ao Ministério de Minas e Energia do governo brasileiro, com caráter de Agência Reguladora do setor elétrico, assim definida como Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. Criada pela Lei Nº 9.427 de

26 de dezembro de 1996 e do Decreto Nº 2.335 de 1997, a ANEEL possui como atribuições principais, regular e fiscalizar a produção, transmissão e comercialização de energia elétrica no Brasil, de acordo com as políticas e diretrizes do governo federal brasileiro, tendo como sede a cidade de Brasília, localizada no Distrito Federal ANEEL (2019).

A ANEEL iniciou suas atividades em dezembro de 1997, tendo como principais atribuições:

- a) Regulação da geração (produção), transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica;
- b) fiscalização diretamente ou mediante convênios com órgãos estaduais, as concessões, as permissões e os serviços de energia elétrica;
- c) implementação das políticas e diretrizes do governo federal relativas à exploração da energia elétrica e ao aproveitamento dos potenciais hidráulicos;
- d) estabelecimento de tarifas;
- e) dirimção das divergências, na esfera administrativa, entre os agentes e entre esses agentes e os consumidores;
- f) promoção das atividades de outorgas de concessão, permissão e autorização de empreendimentos e serviços de energia elétrica, por delegação do Governo Federal.

Visando a aplicação dos conceitos de economia financeira, consciência socioambiental e auto sustentabilidade, em 17 de abril de 2012, entrou em vigor no Brasil a Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012, onde a mesma estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências.

Segundo a Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012, o avanço principal estabelecido é o fato de o consumidor brasileiro poder gerar sua própria energia elétrica a partir de fontes renováveis ou cogeração qualificada, fato este que inclui os sistemas fotovoltaicos de uso residencial ou industrial, inserindo a possibilidade do respectivo consumidor poder fornecer o excedente de sua produção para a rede de distribuição de sua localidade.

O adiamento de grandes investimentos em expansão dos sistemas de transmissão e distribuição de energia, o baixo impacto ambiental causado na implantação das pequenas fontes de produção de energia, a redução do crescente processo de carregamento das redes, a diminuição das perdas e, principalmente, a diversificação da matriz energética foram as variáveis consideradas pelo Governo Brasileiro para a concepção desta resolução, gerando assim, um conjunto de estímulos para o fomento da geração distribuída de energia elétrica.

O Governo brasileiro, por meio da ANEEL, resolveu também fomentar o aumento do público alvo, bem como melhorar as informações na fatura de energia dos consumidores, publicando no ano de 2015 a Resolução Normativa nº 687/2015 que revisa a Resolução Normativa nº 482/2012, reduzindo-se assim os custos e o tempo para a conexão da microgeração e minigeração de energia, compatibilizando-se desse modo o Sistema de Compensação de Energia Elétrica com as Condições Gerais de Fornecimento.

Diante disso, a partir do dia 1º de março de 2016, passaram a vigorar as novas regras estabelecendo-se a permissão para uso de qualquer fonte de energia renovável e da cogeração qualificada, vigorando então os conceitos de minigeração distribuída para aquelas centrais com potência superior a 75kW, sendo menor ou igual a 5MW e, de microgeração distribuída para as

centrais com potencia instalada de até 75kW, ambas que por meio de instalações de unidades consumidoras são conectadas a rede de distribuição (ANEEL, 2016).

Segundo a ANEEL (2016), outro conceito que passou a vigorar no Brasil foi o de “auto consumo remoto” que é definido quando a quantidade de energia gerada em determinado mês for superior a respectiva quantidade de energia consumida naquele mesmo período, o consumidor recebe créditos com validade de 60 meses, que podem ser utilizados para diminuir as faturas dos meses seguintes ou também serem utilizados para deduzir o consumo de outras unidades consumidoras do mesmo cliente, localizadas em outras áreas de atendimento de uma mesma distribuidora.

Outras medidas, também adotadas, referem-se à possibilidade de instalações de gerações distribuídas em condomínios, incluindo os empreendimentos de várias unidades consumidoras, onde nesses modelos, a energia gerada pode ser dividida entre os condôminos em porcentagens estabelecidas pelos mesmos. O Brasil estabeleceu também o conceito de “geração compartilhada”, definindo a possibilidade que diferentes clientes interessados se unam em modelos de consórcio ou cooperativas, realizem as instalações de unidades de micro ou minigeração distribuída e utilizem a energia produzida para fins de redução das faturas dos próprios cooperados ou consorciados (ANEEL, 2016).

Visando simplificar as regras dos procedimentos necessários para se conectar as unidades de micro e minigeração distribuída de energia as redes da distribuidora, foram concebidos formulários padrão para solicitações de acesso pelo cliente consumidor, com um prazo máximo para a distribuidora conectar usinas de até 75kW em 34 dias. A partir de Janeiro de 2017, tornou-se possível que os clientes consumidores pudessem fazer as solicitações e acompanhar os trâmites pela internet, dos seus respectivos pedidos, junto às distribuidoras de energia (ANEEL, 2016).

Neste caso, os sistemas de microgeração fotovoltaica funcionam do seguinte modo: durante o dia, o excedente de energia produzido é disponibilizado à rede, à noite, a rede devolve a energia à unidade consumidora e pode suprir as possíveis necessidades adicionais. Diante disso, caso a unidade consumidora necessite de energia proveniente da rede de distribuição, a mesma irá funcionar como uma espécie de “bateria”, armazenando a produção excedente até o momento de consumo noturno (ANEEL, 2016).

Criado o Sistema de Compensação de Energia Elétrica, por meio da Resolução Normativa da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, nº 687/2015, o mesmo permitiu que o consumidor brasileiro pudesse instalar pequenos geradores, tais como painéis fotovoltaicos, microturbinas eólicas, entre outros, em sua unidade consumidora e trocasse a sua geração de energia com a empresa distribuidora local, objetivando reduzir os atuais valores das faturas de energia elétrica (Eletrobras, 2015).

O Ministério de Minas e Energia do governo brasileiro, editou em dezembro de 2015, a portaria nº 538/2015-MME que institui o Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia (ProGD Elétrica), criando linhas de financiamento que fomentam e desoneram a importação de equipamentos, melhorando o retorno financeiro dos investimentos em micro geração de energia (Eletrobras, 2015).

Diante desse contexto, no Brasil, cabe exclusivamente ao consumidor, a iniciativa de instalação de fontes de micro ou minigeração de energia, a análise das relações custo/benefício, a localização das instalações físicas, os tipos de energia a serem produzidas; fotovoltaica, eólica ou biomassa, as tecnologias dos equipamentos e o porte das unidades geradoras. A ANEEL não estabelece padrões e custos dos geradores a serem utilizados nas plantas de produção de energia e também, não fomenta as iniciativas pessoais dos clientes por meio de condições de financiamento (ANEEL, 2016).

Ressalta-se ainda que, os consumidores pertencentes ao grupo A, conectados a rede de alta tensão, as suas respectivas faturas poderão ser zeradas quando a quantidade de energia produzida no mês for superior ou igual à quantidade de energia consumida, sendo a parcela da fatura correspondente à demanda contratada faturada normalmente. Diferentemente das unidades consumidoras pertencentes ao grupo B, de baixa tensão, pois ainda que a energia produzida seja superior ao consumo, a mesma deverá efetuar o pagamento referente ao custo de “disponibilidade”, ou seja, valores em reais equivalentes a 30kWh para sistemas monofásicos, 50kWh para sistemas bifásicos ou, 100kWh para sistemas trifásicos, respectivamente (ANEEL, 2016).

2.2 INOVAÇÃO TECNOLÓGICA E DIFUSÃO

O consumo de bens tecnológicos é um fenômeno social cada vez mais relevante, tendo em vista que as relações de consumo compõem uma dimensão social importante da vida dos indivíduos. Delimitou-se nesta dissertação os sistemas fotovoltaicos como um bem tecnológico que ao ser introduzido no mercado age como uma inovação uma vez que além a apresentar um progresso tecnológico na forma sobre a qual a energia é gerada e distribuída, a mesma muda a dinâmica do mercado, tornando os agentes que antes eram apenas consumidores de energia elétrica também produtores, alterando a lógica da produção e criando um novo mercado de venda e compra de energia elétrica dentre os micro produtores e as concessionárias. Indo ao encontro do que é definido como tecnologia por Rogers (2003), Hall (2004) e Schumpeter (1961) em seus estudos. Segundo do Nascimento (2014), em geral, os bens são considerados inovadores, quando eles podem reconfigurar as relações sociais, de trabalho ou de acesso à informação. Rogers (2003), define inovação como sendo uma ideia, prática ou objeto que é percebido como novo por um indivíduo, ou outra unidade de adoção. Uma inovação pode ser considerada nova para um adotante individual, um grupo, uma organização ou uma indústria.

Segundo do Nascimento (2014) a inovação é considerada uma fonte de vantagem competitiva e crescimento econômico e, devido a isto, deve ser estudada sob as condições de concorrência global, mudança tecnológica e de situações de mercado, bem como a contínua demanda de cliente por serviços de qualidade. Na academia e nas comunidades praticantes, é comum perceber que as organizações devem inovar para serem efetivas ou até para sobreviverem. A inovação é definida por diferentes perspectivas, como a criação ou adoção de novas ideias. No nível organizacional, a inovação é definida como a adoção de um novo produto, serviço, processo, tecnologia, política, estrutura ou sistema administrativo (Elfring e Hulsink, 2007).

A difusão de tecnologias tem sido o foco de investigação teórica e empírica desde as obras de Fourt e Woodlock (1960), Mansfield (1961), Chow (1967) e Bass (1969). A adoção e difusão de inovações é determinada por quatro elementos principais: as características da inovação, a estrutura do sistema social onde a adoção e difusão tem lugar, os canais de comunicação no sistema social, e o período de tempo do processo de inovação e decisão (Rogers, 2003). Uma variedade de modelos com foco em um ou mais destes elementos foram aplicados a uma grande variedade de campos de pesquisa e de tecnologias e será importante nesse estudo entender o processo pelo qual se dá a difusão de novas tecnologias.

Considerando mecanismos de difusão, alguns estudos avaliam o processo de propagação de inovações, como, por exemplo, os trabalhos seminais de Rogers (2003), que estabelece agentes inovadores que rompem as barreiras iniciais para o uso da tecnologia, e de Bass (1969), que usa conceitos de contágio ou disseminação de doenças. Mais recentemente, Goldenberg et al. (2001) exploram a difusão do uso de produtos pelo *marketing* boca-a-boca, avaliando agentes que influenciam a decisão de outros indivíduos. O objetivo dos modelos de difusão segundo

Mahajan (1990), é mostrar o grau de dispersão de uma inovação num determinado conjunto de potenciais consumidores ao longo do tempo. São modelos que descrevem os aumentos sucessivos da quantidade de adotantes e preveem de que forma se desenvolverá determinado processo de difusão. No estudo de Hall (2004), sobre inovação, a difusão é normalmente utilizada para descrever o processo pelo qual indivíduos e firmas adotam uma nova tecnologia, ou substituem uma tecnologia antiga por uma nova.

O Modelo de Bass (1969), se aplica a bens de consumo duráveis, que são adquiridos com pouca frequência, sendo que os consumidores são divididos em duas classes: inovadores e imitadores. Os inovadores são aqueles que decidem adotar uma inovação independente da decisão dos demais indivíduos que fazem parte do sistema social por isso são as primeiras pessoas a adotar a tecnologia. Os imitadores, por sua vez, são influenciados pela pressão exercida pelos demais membros da sociedade e a adoção da nova tecnologia pelos imitadores depende da quantidade prévia de indivíduos que já a adotaram. De acordo com Mahajan et al. (1990) os inovadores são influenciados por fatores de influência externa, enquanto os imitadores são influenciados apenas pela comunicação interpessoal (influência interna).

Segundo Rogers (2003), a difusão da inovação torna-se um processo difícil e demorado por implicar em mudanças sociais na qual a estrutura do contexto onde ocorre é alterado por consequência da adoção ou não da inovação. Desta forma fundamental entender os processos sociais pelo qual a difusão ocorre e o impacto da sociedade na decisão do consumo do indivíduo.

Na perspectiva do consumidor super socializado o comportamento humano é entendido como sendo um fato social, ou seja, é analisado com base em perspectivas institucionais que exprimem toda espécie de instituições religiosas, jurídicas e morais, aos quais autonomia e vontade própria dos indivíduos são seriamente afetadas. As relações de trocas estabelecidas na sociedade não são analisadas a partir da significação dos indivíduos, mas de como a estrutura social se reflete nelas.

Mauss (2003), afirma que entre os indivíduos, nas relações de troca também existe uma intenção de retribuir relativizando a prevalência do viés utilitarista e da razão prática nas trocas comerciais que são fenômenos coletivos em que a circulação da riqueza é uma das dimensões dentro do contrato social estabelecido.

A relação do indivíduo e da dimensão institucional da sociedade é considerada nos atores sociais, sejam indivíduos ou organização, sempre em interação com diferentes elementos que constituem a sociedade. Nesse sentido, o comportamento dos consumidores não é visto como uma ação pautada na racionalidade e no utilitarismo econômico de sua ação. Também não considera o consumo como um fato social total que reflete essencialmente a estrutura social. O indivíduo é compreendido como imerso culturalmente em sua interação na sociedade constitui suas redes sociais. É esta dinâmica que influencia o comportamento dos consumidores, pois, a tomada de decisão dos indivíduos não deve ser buscada em modelos cognitivos, mas na dinâmica sociocultural (Abramovay, 2004).

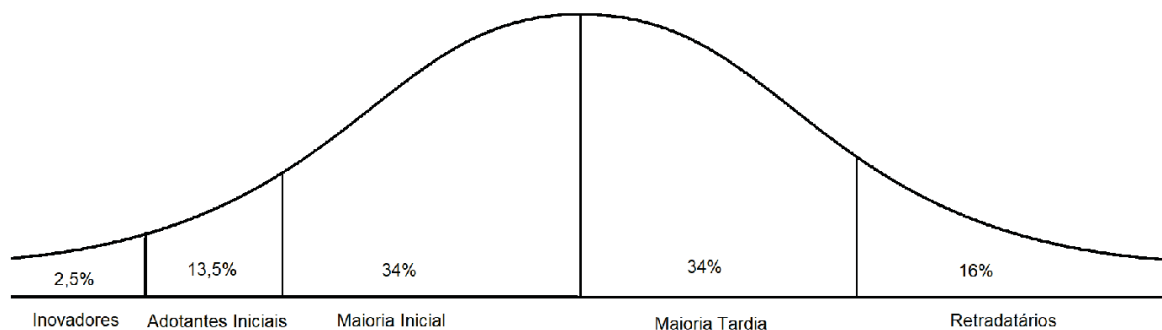
É essa dinâmica sociocultural que Rogers (2003) destaca como sendo à base de produção, difusão e adoção de tecnologias e inovações na sociedade. Então, a adoção de produtos tecnológicos, e do consumo em geral, pode ser compreendida como a interação existente entre as redes sociais, cultura e o consumo. Desse modo, a interação desses três aspectos fomenta os significados dos bens e, conseqüentemente, evidencia padrões de adoção ou não de consumo. Nesse sentido o seu ferramental teórico e metodológico a complexidade das relações sociais no comportamento individual no fenômeno do consumo pode auxiliar na construção de um modelo que leve em consideração as estruturas sociais na influência dos hábitos dos indivíduos.

Em Rogers e Shoemaker (1971) estuda-se que inovações não são adotadas por todos os indivíduos em um sistema social ao mesmo tempo. Em vez disso, eles tendem a adotar em uma

sequência de tempo e podem ser classificados em categorias de adotantes com base no tempo necessário para que eles comecem a usar a nova ideia. Na prática, é muito útil que um agente de mudança seja capaz de identificar a qual categoria certos indivíduos pertencem, uma vez que o objetivo de curto prazo da maioria dos agentes de mudança é facilitar a adoção de uma inovação. A adoção de uma nova ideia é causada pela interação humana através de redes interpessoais. Se o adotante inicial de uma inovação a discutir com dois membros de um dado sistema social, e esses dois se tornarem adotantes que passam a inovação para dois pares, e assim por diante, a distribuição resultante segue uma expansão binomial. Espere que as distribuições de adoção sigam uma curva em forma de sino ao longo do tempo.

Ainda segundo Rogers e Shoemaker (1971), o critério para a categorização do adotante é a sua suscetibilidade às inovações. Isso é definido como o grau em que um indivíduo adota uma nova ideia em relação a outros membros de um sistema social.

Figura 2.2: Categoria de Adotantes

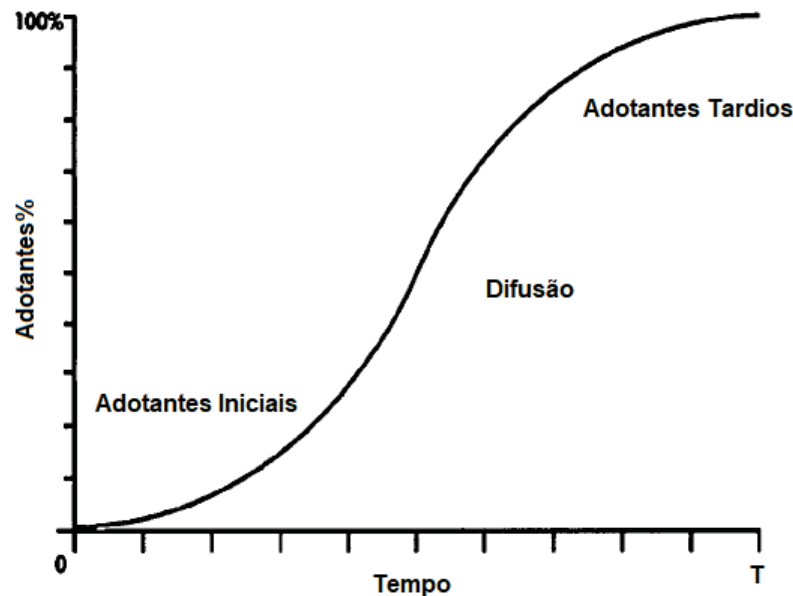


Fonte: Adaptação de Rogers e Shoemaker (1971).

Na Figura 2.2 é apresentado as distribuições de frequência normal divididas em cinco categorias: inovadores, adotantes iniciais, maioria inicial, maioria tardia e retardatários. Os inovadores (*innovators*) são os primeiros 2,5% de um grupo a adotar uma nova ideia. Os próximos 13,5% para adotar uma inovação são rotulados como adotantes iniciais (*early adopters*). Os próximos 34% dos adotantes são chamados de maioria inicial (*early majority*). Os 34% do grupo à direita da média são a maioria tardia (*late majority*) e os últimos 16% são considerados retardatários (*laggards*) (Rogers e Shoemaker, 1971).

Este método de classificação dos adotantes não é simétrico, nem é necessário que seja assim. Existem três categorias à esquerda da média e apenas duas à direita na mesma. Embora seja possível dividir o grupo retardatário em retardatários precoces e tardios, a pesquisa mostra que esse grupo único é razoavelmente homogêneo. Mesmo que os inovadores e adotantes iniciais possam ser combinados, a pesquisa mostra que esses dois grupos têm características distintas (Rogers e Shoemaker (1971)).

Figura 2.3: Curva de Adoção



Fonte: Adaptação de Mahler e Rogers (1999).

Em seu trabalho Mahler e Rogers (1999), mostram que as inovações interativas são distintas na medida em que sua adoção depende do número percebido de outras pessoas que já adotaram a inovação. Assim, sua taxa de adoção não decola no familiar formato “S”, como pode ser visto na Figura 2.3, até que uma massa crítica de adotantes tenha sido alcançada. No seu trabalho foram utilizados dados sobre a adoção de 12 serviços de telecomunicações por 392 bancos alemães para explorar perspectiva teórica sobre o papel da massa crítica na difusão de inovações interativas. O obstáculo mais importante no mercado analisado para a adoção da inovação segundo os autores é o baixo grau de difusão (o que sugere a importância geral da massa crítica). Esses obstáculos não diferem para os inovadores e outras categorias de adotantes. Ao atingir uma determinada massa crítica de adotantes da nova tecnologia o processo de difusão é rapidamente consolidado.

2.3 INTERDEPENDÊNCIA DO CONSUMO

Douglas et al. (2006) avalia que além da dimensão econômica, o consumo de bens tecnológicos expressa mais do que as relações utilitárias das relações de mercado, se constituindo também como um modo de compor as estruturas das relações sociais. Para entender esse fenômeno complexo de difusão de um produto que antes nem se quer era conhecido pelos indivíduos, especialmente em se tratando de um bem que além de apresentar características de um bem de consumo, apresenta retorno como bem de capital, o qual o confere alvo de múltiplas influências. Dessa maneira, é preciso ir além das teorias tradicionais e entender o processo de difusão tecnológica considerando não apenas as preferências e a maximização do processo decisório, mas que existe um processo social que torna a decisão do consumo ainda mais complexa.

As pesquisas sobre o comportamento do consumidor caem na dicotomia do sub e supersocializado discutida por (Granovetter, 1985). Da perspectiva da teoria econômica clássica o consumo segue a lógica do indivíduo racional, que toma suas decisões baseadas na sua função utilidade, isolado do contexto social, nessa, a lógica utilitarista da relação de produção capitalista

é transposta para as relações de consumo. Granovetter (1985), denomina a visão do homem econômico subsocializado, quando as relações sociais não são relevantes no processo de adoção de um bem. Na perspectiva supersocializada, o consumo é considerado um fato social, baseada na estrutura das relações sociais e o indivíduo toma suas decisões a partir das suas vivências. (Mauss, 2003).

A ação individual é entendida com base nos pressupostos socioculturais os quais o indivíduo absorveu durante toda a sua vida, e que se altera de acordo com a influência que ele exerce e é exercida sobre ele, pelo ambiente no qual ele está inserido. Também é visto na obra de Veblen (1899) uma interdependência no hábito de consumo dos agentes. Neste trabalho, o autor expõe como as preferências entre os consumidores não são independentes, há uma emulação dos hábitos de uma classe sobre a outra gerando uma interdependência entre os padrões de consumo. O consumo, então, é percebido como um processo de emulação social, como discutido também na obra de Mauss (2003).

Granovetter (1985), propõe, no seu trabalho, que uma das questões clássicas da teoria social é como os comportamentos e as instituições são afetadas pelas relações sociais, dando destaque à discussão sobre a importância das redes na economia e afirmando que a economia está estruturalmente imersa (*embedded*) nelas. Segundo do Nascimento (2014), uma das questões relevantes nesta análise é como os comportamentos e as instituições são afetadas pelas relações sociais, dando destaque à discussão sobre a importância das redes na economia e afirmando que a economia está estruturalmente imersa nelas.

Para Baldi e Vieira (2006), a preocupação de Granovetter está no fato de que é necessário estabelecer um adequado elo entre as teorias de nível macro e nível micro. Neste mesmo sentido, em seu trabalho, da Silva Souza e da Silva (2006) considera que um indivíduo está imerso socialmente, pode-se compreender que o mesmo está interagindo com o contexto do grupo ao qual pertence de forma que, ao mesmo tempo, em que ele sofre influência dessa interação, e o mesmo, provoca influência no meio.

Zukin e DiMaggio (1990) propõem várias formas de imersão social, paralelamente à imersão estrutural, cultural, política e cognitiva, sendo que todas compartilham da mesma ideia, dando importância às considerações sociais nas relações econômicas. Granovetter (1985) da imersão social se referindo às relações entre pelo menos duas pessoas e à estrutura da rede de relações como um todo, afetando também as relações econômicas. Referindo-se a um contexto social, as relações também estão imersas na cultura, na qual as ações dos indivíduos dentro de um grupo refletem seus sistemas de crenças e valores. Ao se relacionarem, as pessoas produzem e reproduzem valores e outros aspectos culturais, criando laços que as unem. O que produz estes laços é o compartilhamento da cultura entre os indivíduos (Granovetter, 1985).

Em seu trabalho Powell et al. (1996), afirmam que uma rede é composta por um conjunto de laços entre indivíduos ou organizações. Um laço entre estes tem conteúdo e forma. O conteúdo dos laços pode incluir informação ou fluxo de recursos, conselho ou amizade, pessoal ou membros de um conselho de diretores; de fato qualquer tipo de relação social pode ser definido como um laço. Assim, a rede passa a ter como ideia principal a de que a situação e a identidade do ator dependem de suas interações com outros atores e da interação destes atores com outros membros da rede (da Silva Souza e da Silva, 2006).

2.4 REDES SOCIAIS

O estudo das redes teve um maior desenvolvimento de a partir dos avanços matemáticos desenvolvidos por Erdős (1959) e Erdos (1961) em relação aos grafos aleatórios (*random graphs*) define-se uma aresta entre cada par de nós com igual probabilidade, independentemente das

outras arestas. A análise dos gráficos aleatórios serviu como base para o início da análise de redes sociais. As redes sociais são de acordo com Wasserman e Faust (1994) uma estrutura social constituída de indivíduos denominados de nós, que estão conectados a uma ou mais pessoas por diferentes tipos de laços.

Apesar das propriedades descobertas por Erdős (1959) e Erdos (1961) uma rede aleatória não apresenta características importantes para representar uma rede social. A partir do trabalho de Watts e Strogatz (1998) há uma melhor compreensão a respeito dos mecanismos de formação das redes sociais. Em seu trabalho os autores constroem um modelo em que há a formação inicial de uma estrutura que os agentes mais próximos são ligados entre si, mas existe uma probabilidade de que alguns laços se quebrem e se reconecte com outros indivíduos mais longe. Dando assim a característica de um mundo pequeno (*small-world*).

A ideia de redes do tipo mundo pequeno remete ao trabalho realizado por Milgram (1967) que investigou o chamado problema do mundo pequeno (*small-world problem*), que fez um estudo empírico que basicamente orientou que indivíduos de um grupo deviam passar uma carta entre sua rede de conhecidos até que a mesma chegasse a um determinado destinatário, só sabendo seu nome e sua profissão e avaliou-se que a carta passava entre 2 e 10 pessoas antes de chegar em seu destinatário. Com base neste estudo muitos outros estudos foram feitos a *posteriori*, percebeu-se uma característica importante das redes sociais: há uma estrutura que é localmente muito conectada, com a formação de *clusters* e grupos, e possui um número médio baixo de degraus de separação entre indivíduos da *network*, que é a medida do número de conexões necessária para conectar duas pessoas aleatórias dentro de uma *network*.

Watts (2004) conceituou que a rede e o reconhecimento das suas capacidades descritivas e explicativas ultrapassam os limites das ciências sociais estendem-se, cada vez mais, a outros domínios científicos. Desde os finais da década de 90 diversas obras vêm defendendo a emergência de uma “nova ciência das redes” (que usa o conceito como forma de apreender as interconexões do mundo contemporâneo. Neste campo procura-se “padrões e regularidades na arquitetura de diferentes tipos de redes” (Buchanan et al., 2002). Desde a *world wide web*, aos mercados financeiros, às epidemias, passando pela investigação científica e o terrorismo, estes autores mostram a sociedade contemporânea “como uma rede social complexa”, ao mesmo tempo, que demonstram a “pequenez do grande mundo onde vivemos” (Barabási, 2003).

Sob um ponto de vista econômico, Krackhardt e Brass (1994) estabelecem que as redes sociais estão associadas com interações que afetam o acesso aos recursos. Para Collier (1998), as redes sociais contemplam um capital social que gera conhecimento sobre o comportamento de agentes, conhecimento do mercado e benefícios da ação conjunta de indivíduos.

2.5 MODELOS BASEADOS EM AGENTES

Segundo Kowaltowski (1996) o primeiro Autômato Celular foi projetado por John Von Neumann no final dos anos 40 objetivando simular comportamentos evolutivos, sistemas que através de interações e regras simples evoluem e geram comportamentos complexos. O estudo de Neumann despertou grande interesse devido à capacidade de simular comportamentos auto organizados e complexos que são observados em sistemas naturais. Os estudos sobre Autômatos Celulares ganharam importância principalmente pelo sucesso em criar simulações e previsões de eventos naturais e comportamentos dos sistemas vivos. Os autômatos celulares são ferramentas que podem representar quase todos os sistemas evolutivos que se pode imaginar (Goldberg e Holland, 1988).

Suas principais características são a computação descentralizada, onde cada célula pode computar sua evolução apenas se baseando nos estados anteriores do sistema de células, e a

simplicidade de suas regras que, dificilmente podem ter suas consequências previstas, atualmente pesquisadores de vários diferentes campos utilizam modelos de autômatos celulares para simular diferentes tipos de aplicações na biologia evolutiva, na dinâmica de reações químicas, nos sistemas dinâmicos da física, no comportamento de agentes econômicos e de mercados, entre muitas outras coisas (Mitchell, 2009).

Eventos complexos compreendem um amplo corpo de conhecimentos cujo foco essencial é o estudo dos sistemas dinâmicos não-lineares cujo comportamento imprevisível perpassa disciplinas tradicionais e contraria o mecanicismo clássico (Goldberg e Holland, 1988). Em quanto a metodologia tradicional trabalha com modelos altamente agregados que são usados para representar processos sociais, mesmo tais modelos possam oferecer resultados poderosos, eles acabam filtrando todas as consequências da heterogeneidade o que cria uma perda significativa nos resultados como apresenta Epstein e Axtell (1996) em seu livro. Visto que a consequência desse fato pode ser crucial importância, uma vez que pelos métodos tradicionais não há metodologia consolidada para estudar sistemas com heterogeneidade das populações nem interações complexas interações entre os agentes estudados.

Em seu livro, Mayfield (2013), analisou que alguns desafios exigem respostas simples, mas que na sua modelagem exige uma computação extensiva. Em particular, há uma tendência para que os desafios que o autor chama de profundos sejam atendidos otimamente por respostas profundas. O autor indaga sobre como surgem os problemas profundos no mundo, e para isso ele dá um exemplo sobre ambiente físico experimentado por um organismo não é muito complexo. A maioria dos aspectos do ambiente físico são aleatórias ou repetitivas. Exemplos são o ciclo diurno e o fato de que será frio no inverno e quente no verão. No dia a dia os detalhes do tempo são efetivamente aleatórios dentro de um amplo contexto climático. Se os organismos precisam apenas lidar com o ambiente físico, não deve-se esperar que eles desenvolvam estruturas particularmente complexas. O autor nos traz um exemplo biológico simples, mas que mostra que quando uma estrutura que não pode ser modelada pela econometria tradicional.

Por mais que os estudos da complexidade sirvam não apenas para o ramo das ciências sociais, abarcando temas como física, química, biologia, ecologia e muitas outras áreas do conhecimento. Neste trabalho se delimitou os estudos relacionados com as ciências sociais e como a metodologia de modelos baseados em agentes conseguem criar uma simulação para responder perguntas que dependem de agentes heterogêneos criando um ambiente complexo de interações.

Gilbert (2008), discute a importância desta nova ferramenta frente ao equilíbrio geral uma vez que o mesmo não se sai bem frente a mudanças drásticas nas variáveis do modelo, sendo capaz de ter bons resultados preditivos em cenários estáveis, mas não prevendo grandes mudanças estruturais. Em seu livro, o autor afirma que a simulação baseada em agentes tornou-se cada vez mais popular como uma abordagem de modelagem em ciências sociais, pois, permite para o pesquisador analisar os fenômenos individuais e suas interações criando uma dinâmica que podem emergir diversos padrões a serem analisados.

Ainda em seu livro, Gilbert (2008) compara a abordagens baseadas com variáveis utilizando equações estruturais, ou abordagens baseadas no sistema utilizando equações diferenciais. A simulação baseada em agentes oferece a possibilidade de modelar a heterogeneidade do indivíduo, representando explicitamente regras de decisão dos agentes, e situando agentes em uma geográfica ou outro espaço. Esta metodologia permite que os pesquisadores representem de uma forma natural várias escalas de análise, o surgimento de estruturas ao nível macro ou social da ação individual.

Formalmente, modelagem baseada no agente é um método computacional que permite criar um modelo, analisar as experiências com modelos compostas de agentes que interagem no

interior de um ambiente. Um agente pode até ser uma representação de um componente social interagindo de um grande sistema usado para explorar o comportamento global emergente em uma simulação (Gilbert e Troitzsch, 2005), (Niazi e Hussain, 2011).

A metodologia de modelagem baseada em agentes é um ferramental que lida com a construção de modelos computacionais, uma vez que o número de interações é muito alto e seria irreal calculá-los de outra forma. A ideia de modelo das ciências sociais segundo Suppes et al. (1994), é criar uma representação simplificada da realidade, que serve para expressar quão claro quanto possível a maneira em que se acredita que a realidade opera. Por exemplo, se alguém tem uma variável dependente e uma ou mais variáveis independentes, uma equação de regressão serve como um modelo da relação entre as variáveis (Gilbert e Troitzsch, 2005).

Normalmente, um agente nestes modelos representam um indivíduo, mas pode representar uma casa, uma empresa, uma nação ou qualquer agregado de análise do pesquisador (Gilbert, 2008). Heterogeneidade dos agentes é uma característica fundamental, cada agente pode ter um conjunto único de características e regras de comportamento, além disso, nesta abordagem pode-se importar a distribuição espacial dos agentes, podendo os distribuir de forma aleatória em todo o espaço ou de acordo com algum outro princípio e o ambiente (espaço) no qual os agentes interagem podem determinar (ou não) as suas características ou ações (da Silva Souza e da Silva, 2006).

Modelos em que o ambiente representa um espaço geográfico são chamados espacialmente explícitos. Em outros modelos, o ambiente pode ter um espaço, mas que não representa geografia, mas algum outro recurso. Por exemplo, Gilbert et al. (2001) simularam “espaço de conhecimento”, neste modelo espacial, os agentes têm coordenadas para indicar a sua localização no espectro do conhecimento, dividindo características entre dois eixos. Uma outra opção é ligar os agentes juntos a uma rede em que a única indicação da relação de um agente para outros agentes são as listas dos agentes ao qual está conectado por ligações de rede (Carrington et al., 2005).

Desta forma os agentes são usados para representar os atores individuais, sociais e pessoas, organizações como empresas, ou organismos. A possibilidade de modelar estas interações de agente para agente é a principal forma na qual modelagem baseada em agentes difere de outros tipos de modelos computacionais (Gilbert, 2008). Neste contexto os agentes são programados para reagir a diversos estímulos sobre o ambiente no qual eles estão localizados. Desta forma esta modelagem é bem abrangente e existem diversas aplicações e tipos de modelos com diferentes objetos de análise e diferentes estruturas combinadas o que torna esta metodologia tão ampla podendo ser utilizada para responder uma gama quase incontável de problemas que lidam com a complexidade das interações entre diversos agentes.

2.5.1 Modelos para o Setor de Energia

A modelagem baseada em agente também foi aplicada na investigação da adoção de diversas tecnologias ligadas ao setor de energia. Schwoon (2006), analisou como os impostos sobre os carros comuns poderiam ser um fator preponderante na disseminação de carros movidos a hidrogênio. Cantono e Silverberg (2009), criam um modelo de disseminação de inovação de um bem ligado ao setor de energia, avaliaram diferentes políticas de subsídio e o seu impacto na difusão do produto analisado.

Já no caso de Faber et al. (2010), o modelo criado analisa um produto de cogeração de energia, analisando o mercado da Holanda. No estudo os pesquisadores analisaram a disseminação de uma tecnologia que aproveita o gás que já é usado nas residências no aquecimento para a geração de energia elétrica, com isso é analisado a variação no preço da energia e do gás natural e como estas trajetórias influenciam na difusão desta tecnologia.

Zhang e Nuttall (2011), desenvolveram um modelo baseado em agentes com interações de jogos com múltiplos jogadores, a fim de avaliar a eficácia da política do governo do Reino Unido na implementação de um aparelho de medição inteligente de energia elétrica neste país. As contribuições são tanto nas áreas de formulação de políticas para a promoção da difusão da inovação no mercado da eletricidade, analisando as possíveis condutas não esperada dos consumidores reagindo de forma não esperada aos incentivos das políticas, quanto em seu uso metodológico da simulação baseada em agentes para estudar o impacto das políticas sobre a dinâmica da difusão da inovação.

Siebert et al. (2017) com base na economia comportamental e na modelagem baseada em agentes criaram um modelo para analisar o comportamento das pessoas no consumo de eletricidade usando uma estrutura na qual o consumidor é o principal agente dos sistemas de energia. As propriedades emergentes do consumo de eletricidade são modeladas pelos meios de heurística do consumidor, levando em conta o preço da eletricidade, o nível de satisfação do consumidor, a disposição de investir em novas tecnologias, interações sociais e estratégias de marketing pela concessionária de energia. A análise do comportamento emergente dessa abordagem por meio de estudos de simulação mostrou que ela é de fato valiosa, já que não requer dados detalhados de todos os detalhes sobre o comportamento humano.

Zhang et al. (2011), utilizam um modelo com base em agentes para investigar fatores que podem acelerar a difusão de como chamam em seu trabalho ecoinovações, no caso, veículos com combustível alternativo e consideram as interdependências de inerentes entre os participantes-chave na indústria automotiva: fabricantes, consumidores e agências governamentais. Neste caso foi feito uma entrevista com 7000 pessoas para criar os parâmetros utilizando econometria, desta forma o modelo tem maior robustez.

2.5.2 Modelos de Difusão de sistemas fotovoltaicos

Em literatura recente Zhao et al. (2011), Robinson et al. (2013) e Palmer et al. (2015) implementaram MBA para simular a difusão de sistemas fotovoltaicos ¹. Esses autores modelam exclusivamente a difusão da tecnologia fotovoltaica, fazendo um paralelo bem próximo ao proposto nessa dissertação.

O modelo de Zhao et al. (2011) é um modelo híbrido de simulação de dois níveis, onde o nível inferior diz respeito ao cálculo do período de retorno de uma família individual baseado na geração e consumo de eletricidade por hora, incentivos fiscais e financeiros, preço do sistema fotovoltaico, e preço da eletricidade por hora. No nível mais alto, os domicílios heterogêneos tomam uma decisão semanal sobre adotar ou não a tecnologia, avançando para 20 anos. A escolha do agregado familiar é influenciada por quatro factores: período de retorno, rendimento do agregado familiar, boca a boca e efeito de publicidade. O perfil de uma família varia de acordo com a renda e o número de membros. O modelo é assim calibrado para duas áreas residenciais em duas regiões diferentes em Tucson, Arizona e Nova York, EUA. O modelo também considera dois tipos de incentivos financeiros: crédito fiscal para investimento e tarifa *feed-in* que permite simular diferentes políticas públicas. O desconto de imposto é considerado constante. O consumo de energia pelos domicílios é calculado por hora com base em uma cesta de bens duráveis e hábitos derivados de pesquisas reais. Pelo lado da oferta, a quantidade de energia depende da eficiência do painel (um parâmetro fixo) e da radiação solar horária, mas nenhuma quantidade de energia produzida pela família é mostrada. Neste modelo, o autor apenas calcula o número de adotantes e nenhum balanço energético de toda a cidade é mostrado. Embora

¹Uma pesquisa sobre modelos ABM de difusão da inovação em diferentes mercados ou produtos pode ser encontrada em Kiesling et al. (2012).

o preço varie de hora em hora, dependendo da demanda, o preço de fato é fixado exogenamente, assumindo um nível decrescente arbitrário a longo prazo.

O modelo desenvolvido por Palmer et al. (2015) é adaptado para estudar o mercado de fotovoltaico italiano ²; caracterizar os agentes de acordo com as categorias adotadas por Rogers (2003); e novo procedimento para calibrar as condições iniciais. Como Zhao, no modelo de Palmer, o preço da energia é exógeno e fixo no início de uma simulação, e os domicílios avaliam uma função de utilidade linear e aditiva com quatro componentes ponderados: período de retorno, benefícios ambientais para investir em sistemas de geração solar, renda, redes sociais ou comunicações. Mas diferentemente, a quantidade de energia produzida pelas famílias depende de quatro variáveis: área de cobertura disponível para módulos fotovoltaicos, a eficiência das células solares, a eficiência do sistema fotovoltaico e a irradiação em condições padrão, que é assumido como igual a 1 kW/m². Outra novidade introduzida no modelo é uma equação para calcular os custos de instalação de um sistema fotovoltaico, como taxas administrativas, manutenção e depreciação. Uma característica importante do modelo de Palmer é que ele é um modelo regional e não urbano. A população da Itália é distribuída pelas regiões que preservam as características de cada região e, em seguida, o modelo é calculado para todo o país. Uma característica importante introduzida por Palmer é o tipo de casa habitada por uma família. Um agente representa um agregado familiar que vive numa casa de uma ou duas famílias, onde um único tem uma área de telhado maior. Durante a rotina de inicialização, os agentes são alocados nessas casas de acordo com o nível de renda.

Os aspectos baseados em agentes de ambos os modelos são os mesmos: uma família adota a nova tecnologia baseada no número de adotantes na vizinhança. Enquanto no modelo de Zhao assumem um número limite de 4 ligações para todos, no modelo de Palmer o número de ligações varia entre os agregados familiares e ocorre principalmente entre os agentes que pertencem ao mesmo contexto socioeconômico. Um aspecto comum a esses modelos é que, apesar do fato de considerarem uma cidade Zhao et al. (2011) ou regiões Palmer et al. (2015) onde as famílias vivem, a difusão ocorre apenas na dimensão de tempo no nível agregado.

Por fim, Robinson et al. (2013) apresenta um modelo no qual os agentes tomam decisão com base na sua rede social, levando em consideração parte das convicções próprias e parte da convicção dos outros agentes da sua rede, do seu nível de renda e do tempo de retorno com gastos no sistemas fotovoltaicos. No Trabalho de Robinson diferente dos outros dois, é proposto uma análise geográfica, utilizou-se as distancias de uma cidade real dos Estados Unidos (Austin, Texas). Mas a heterogeneidade está ligada ao indivíduos não as regiões da cidade.

No modelo proposto nessa dissertação muito do comportamento dos agentes e estrutura do modelo está ligado a esses três trabalhos. Considerou-se o retorno sobre investimento feito pelas famílias na sua tomada de decisão, o nível de renda, o perfil mas não ligado ao lado ecológico e sim um perfil ligado a inovação, as redes sociais que exaustivamente foram apresentadas nesse capítulo e considerou-se também no modelo o espaço físico, mas diferente do trabalho de Robinson et al. (2013) o espaço físico além de afetar as redes sociais é apresentado como um dos determinantes da heterogeneidade dos indivíduos. Outro ponto em que o modelo proposto na dissertação se propõem a ir além é integrar uma rede elétrica e avaliar o impacto dinamicamente ao longo do modelo, abrindo mais um leque de opções a serem exploradas.

²Que incluem sistema de incentivos, regulação de preços, demografia, comportamento de agregados familiares e irradiação.

3 O MODELO

Em geral, um modelo baseado em agentes tem como principal objeto buscar padrões emergentes que possam descrever um fenômeno dado um conjunto de regras e estímulos do ambiente. Com isso o objetivo do modelo proposto neste trabalho é reproduzir padrões de fenômenos encontrados no mundo real com base na literatura sobre difusão tecnológica, interdependência do consumo e redes sociais para simular o processo da tomada de decisão das famílias na adesão da geração distribuída de energia solar, para avaliar o impacto que a difusão desta tecnologia pode gerar na rede elétrica e seus desdobramentos. Aqui o foco se dá, na geração domiciliar, não considerando a geração fotovoltaica de empresas e indústrias.

Para isso o modelo simulado conta com 3 níveis de interação. O primeiro no ambiente macro, o preço, é formado com base na relação da oferta de energia convencional e da energia gerada pelos sistemas fotovoltaicos residenciais. No segundo nível é simulado a rede de distribuição elétrica de uma cidade hipotética e dado o consumo e a produção de cada indivíduo será realizado a análise do fluxo de potência desse sistema. Por fim, no terceiro nível simulou-se a cidade com suas características regionais e os agentes tomando decisões de forma descentralizada, ou seja, cada família toma a decisão do investimento nos sistemas fotovoltaicos com base no seu conjunto de parâmetros e estímulos tanto do ambiente quanto dos demais indivíduos.

Para isso lançou-se mão neste trabalho de dois *softwares* para a modelagem e um para a análise. No NetLogo versão 6.0.2 foi construído o ambiente, as redes elétricas e a interação entre os agentes. Já no Matlab versão R2017b, mais especificamente o pacote Matpower 6.0 para a análise do fluxo de potência. Para análise estatística dos resultados utilizou-se o R versão 3.5.0, uma linguagem de programação que especializada em manipulação, análise e visualização gráfica de dados.

3.1 AMBIENTE

Como ambiente pode-se entender, a cidade na qual as famílias e suas residências foram simuladas. As famílias foram simuladas em um plano e distribuídas uniformemente no espaço. Além disso, a cidade foi dividida em 32 regiões contendo 120 famílias e um transformador de distribuição para alimentação das residências em baixa tensão, em cada região. Como limitante do modelo a cidade simulada não apresenta diferentes densidades populacionais, não possui indústrias e empresas uma vez que o foco é apenas a difusão residencial. Outro aspecto que o modelo assume é que não existe crescimento populacional ou físico da cidade ao longo dos 10 anos de simulação.

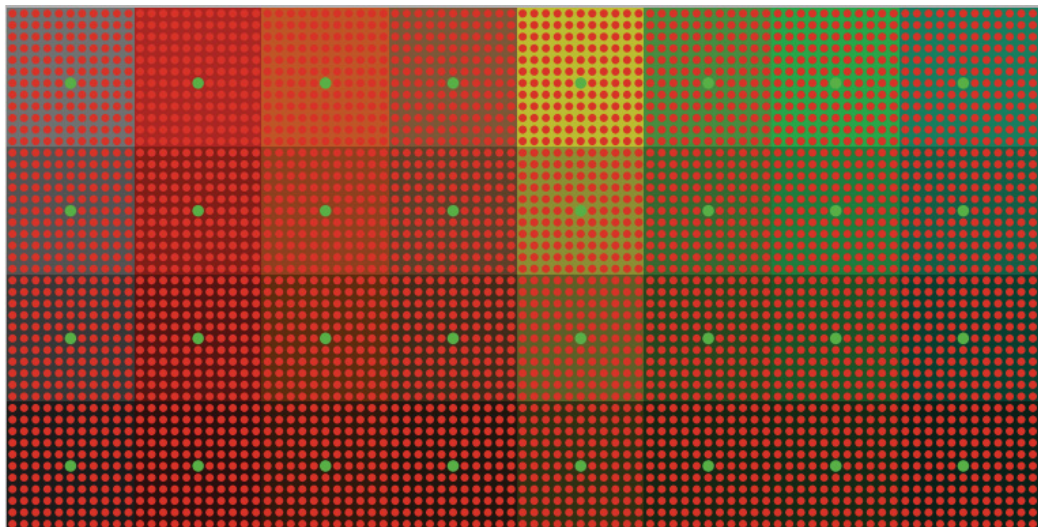
Figura 3.1: Representação das 32 Regiões do Modelo

4	8	12	16	20	24	28	32
3	7	11	15	19	23	27	31
2	6	10	14	18	22	26	30
1	5	9	13	17	21	25	29

Fonte: Elaboração Própria.

A Figura 3.1 representa as 32 regiões do modelo, enumeradas. Já na Figura 3.2 é possível visualizar a representação gráfica da cidade simulada. Os retângulos coloridos são as 32 diferentes regiões, os círculos vermelhos uniformemente distribuídos são as 3840 residências, tendo 120 em cada região e por fim cada círculo verde representa um transformador que será melhor explicado na Seção 3.8.

Figura 3.2: Representação Gráfica da Cidade Simulada



Fonte: Elaboração Própria.

Para calcular a geração de energia fotovoltaica foi necessário simular a irradiação solar e a temperatura da cidade hipotética. Na simulação dos dados de irradiação solar e temperatura, foi utilizado os dados da cidade de Curitiba, no estado do Paraná, para isso contou-se com os dados disponibilizados pelo Sistema Meteorológico do Paraná (SIMEPAR). Com os dados horários do dia primeiro de janeiro de 2012 a 31 de dezembro de 2017, um intervalo de 6 anos, foi possível calcular a média da temperatura e a irradiação solar e suas variâncias dentro de cada hora do mês. Os dados dessa estimativa seguem no apêndice A.

Para criar um efeito de heterogeneidade climática dentro dos dias do modelo simulado, foi implementado um erro aleatório a cada média calculada, para representar as diferenças climáticas reais que existem entre os dias.

Dessa forma a temperatura no modelo é representada conforme a equação 3.1:

$$T_{h,t,a} = \bar{T}_{h,t} + e_{h,t}^1 \quad \text{onde} \quad e_{h,t}^1 N \sim (0, \sigma_{h,t}^1) \quad (3.1)$$

na qual, $T_{h,t}$ é a temperatura da cidade na hora h e no mês t . Já $\bar{T}_{h,t}$ é o valor médio da temperatura na hora h e no mês t , calculado com base na média dos dados do SIMEPAR de cada hora de um determinado mês. Já $e_{h,t}^1$ é o erro aleatório que segue $N \sim (0, \sigma_{h,t}^1)$, e $\sigma_{h,t}^1$ é calculado com base na média da variância horária da temperatura de cada mês dos dados do SIMEPAR.

No caso da irradiação solar que incide na cidade simulada:

$$R_{h,t,a} = \bar{R}_{h,t} + e_{h,t}^2 \quad \text{onde} \quad e_{h,t}^2 N \sim (0, \sigma_{h,t}^2) \quad (3.2)$$

Nesse caso, $R_{h,t}$ é a irradiação solar que incide na cidade no mês t e na hora h . Já $\bar{R}_{h,t}$ é o valor médio de irradiação solar calculado para cada hora de um determinado mês com base nos dados do SIMEPAR. E o $e_{h,t}^2$ é o erro aleatório que segue $N \sim (0, \sigma_{h,t}^2)$, onde $\sigma_{h,t}^2$ é calculado com base na variância média da irradiação horária de cada mês dos dados do SIMEPAR. Os dados climáticos utilizados do modelo estão dispostos no Apêndice A dessa dissertação.

3.2 TEMPO

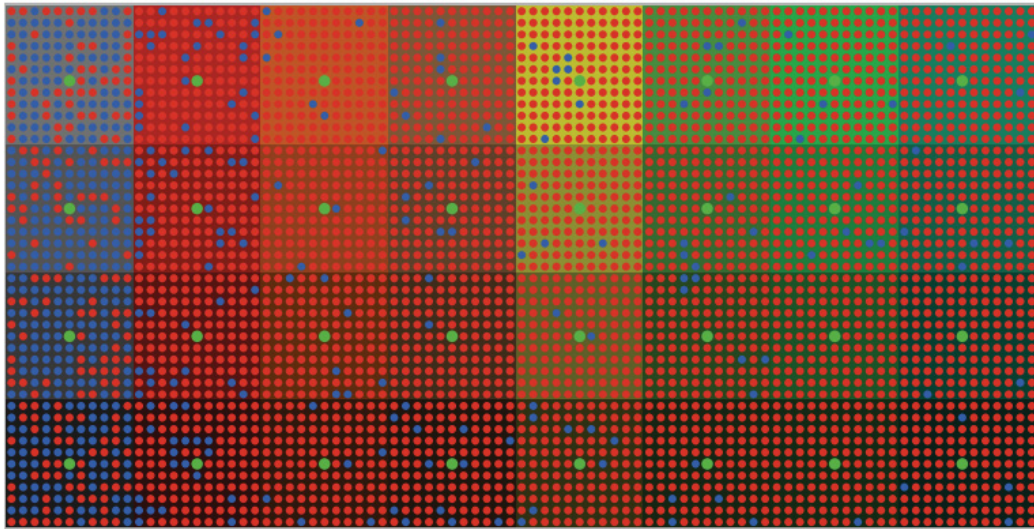
O modelo simula a difusão de sistemas fotovoltaicos e o impacto na rede elétrica para um período de 10 anos. Como os efeitos na rede são gerados de forma horária, foi preciso simular às 24 horas do dia para se obter a variação horária da geração e da carga dentro do sistema. As curvas de geração e carga seguem a mesma distribuição dentro dos dias de um mesmo mês, uma vez que as decisões que podem interferir nesses parâmetros só se alteram mês a mês como será melhor explorado na Seção 3.7, simulou-se então apenas um dia representativo para cada mês e os impactos gerados na rede nesse dia podem ser estendidos para os demais dias dentro do mesmo mês. Dessa forma, ao invés de calcular 86.400 interações das 24h simuladas para os 10 anos, torna-se necessário somente 2 880 interações por considerar um dia do mês sendo o dia representativo. Dessa forma dentro do modelo o mês é apresentado como t e hora como h .

3.3 AGENTES

Os agentes do modelo analisado são as famílias. Cada uma delas tem uma residência, um perfil de adesão tecnológica, um nível de renda e cada uma está inserida em uma rede social com um determinado número de famílias, os quais influenciam nas suas decisões e são influenciados por ela, esses conceitos serão melhor explorados na Seção 3.7.

Com base no conjunto de características que as famílias possuem e de outros estímulos externos, seja a irradiação solar, a temperatura, o preço da energia elétrica, o custo de adquirir um sistema fotovoltaico, entre outros, as famílias do modelo podem optar mensalmente por adquirir um sistema fotovoltaico ou não. Com isso é possível analisar as trajetórias da difusão dos sistemas no modelo e quais serão os impactos gerados na rede elétrica da cidade.

Figura 3.3: Representação Gráfica da Cidade Simulada com Difusão Tecnologia



Fonte: Elaboração Própria.

Diferente da Figura 3.2, na Figura 3.3 existem círculos vermelhos e azuis. As residências que não possuem sistemas fotovoltaicos são representadas pelos círculos vermelhos já as que o adquiriram os mesmos são representadas pelos círculos azuis.

3.4 PREÇO DA ENERGIA

Para a tomada de decisão dos agentes é importante entender como o preço nesse mercado é formado e quais são as suas influências. No modelo o preço simulado é o preço real da energia, desconsiderando assim o efeito de uma possível inflação no seu valor. Dessa forma as variáveis de preço se tornam comparáveis ao longo do tempo sem a necessidade de deflacioná-las. Outro aspecto importante do modelo é que se separou o preço no qual o indivíduo compra energia da distribuidora do preço que ele vende a energia gerada pela sua residência, no Brasil essa diferenciação ainda não existe uma vez em que a energia gerada é apenas abatida da energia consumida, mas para estudar diferentes cenários de políticas públicas essa dissociação vem a ser relevante.

No modelo pode-se assumir dois tipos de tarifa a comum ou a branca, ou seja, o preço pode ser constante ao longo das horas do dia ou cada hora pode ter um valor diferente associado a mesma. No regime brasileiro essa decisão depende de cada família, no caso cada uma opta se deseja ser tarifada no preço fixo (comum) ou no preço horário (branca), mas por simplificação no início de cada simulação definiu-se qual será o regime que todas as famílias devem adotar. Além disso, no Brasil caso a renda familiar seja menor que 3 salários mínimos, existem diferentes níveis de preço de acordo com o consumo das famílias e esse aspecto também foi considerado. Outro aspecto importante é que foram divididos os preços em livre de impostos ao consumidor e preços com os impostos, podendo assim analisar o impacto de políticas tributárias na tarifa de energia elétrica.

Os preços propostos no modelo decrescem ao nível que a tecnologia é difundida na sociedade. Como parte do preço da tarifa de energia elétrica é destinada para reinvestimento em melhorias e expansão da rede elétrica, o aumento do uso de geração distribuída cria uma redução nos custos, uma vez que a energia é gerada junto aos polos consumidores. Outro motivo pelo qual foi considerado no modelo é que os preços decrescem com o aumento da difusão dos sistemas fotovoltaicos e que a matriz energética se diversifica tornando-a menos susceptível a

fatores externos como, por exemplo, o caso do Brasil em que as estiagens prolongadas podem fazer com que as hidroelétricas não deem conta da demanda nacional e tornar-se necessário acionar as termelétricas, o que impacta em preços mais altos da energia. Por fim, essa difusão também aumenta a oferta de energia no sistema causando uma pressão na queda dos preços da energia comercializada (lei de oferta e demanda). Considerou-se no modelo que esses fatores levariam a uma redução do preço da energia, por isso foi proposto na Equação 3.3:

$$P_{i,h,t,a}^C = P_{i,h,0,0}^C(Y_i, \bar{C}_i^{mes}, S) \left[1 - \beta_0 \left(\frac{F_{a-1}^{tec}}{F} \right) \right] \quad (3.3)$$

Na Equação 3.3, $P_{i,h,t,a}^C$ é o preço da energia para a família i , na hora h , no mês t e no ano a . Já $P_{i,h,0,0}^C$ é o preço inicial da energia, para a família i , ele depende de Y_i , a renda familiar, na carga mensal média da sua residência (\bar{C}_i^{mes}) e do regime tarifário S , como pode ser visto na tabela 3.1 que foi construída com base nos dados tarifários da Companhia Paranaense de Energia (COPEL) no ano de 2019.

Já F_{a-1}^{tec} é o total de famílias que adotaram o sistema fotovoltaico no ano anterior, F é o total de famílias do modelo e β_0 é o coeficiente que determina o quanto a proporção de famílias adotantes do sistema fotovoltaico impacta no preço da energia. Foi utilizado a quantidade de adotantes da tecnologia no ano anterior uma vez que os contratos de tarifa de energia tem ajustes programáticos anuais, ou seja, caso não ocorra nenhum evento fora do convencional os preços só devem ser reajustados de ano em ano.

Tabela 3.1: Preço da Energia no Paraná por kWh

Modalidade	R\$/kWh ^[1]
Tarifa Comum	
Tarifa Convencional	0,50752
Baixa Renda ^[2] -Consumo mensal inferior ou igual a 30 kWh	0,16188
Baixa Renda-Consumo mensal entre 31 kWh e 100 kWh	0,27750
Baixa Renda-Consumo mensal entre 101 kWh e 220 kWh	0,41625
Baixa Renda-Consumo mensal superior a 220 kWh	0,46250
Tarifa Branca^[3]	
Ponta - 18h00 às 21h00	0,91974
Intermediário-17h00 às 18h00 e 21h00 às 22h00	0,59690
Fora de Ponta-22h00 às 17h00	0,43568

Fonte: Elaboração própria baseado nos dados disponibilizados da COPEL (2019)

(1) Preços da tarifa de energia sem os impostos ao consumidor.

(2) Baixa renda são consideradas as rendas familiares menor do que 3 salários mínimos.

(3) Tarifa com variação horaria.

Já tendo definido os preços iniciais e o mecanismo de formação de preço, serão adicionados aos preços os impostos aos consumidores, conforme a Equação 3.4:

$$\hat{P}_{i,h,t,a}^C = P_{i,h,t,a}^C M^{tr} \quad (3.4)$$

onde $\hat{P}_{i,h,t,a}^C$ é o preço da energia elétrica no tempo (h, t, a) para a família i após a aplicação da tributação e M^{tr} é o multiplicador tributário da tarifa de energia. O M^{tr} pode ser decomposto conforme a Equação 3.5:

$$M^{tr} = \left(\frac{1}{1 - pis} \right) \left(\frac{1}{1 - cofins} \right) \left(\frac{1}{1 - icms} \right) \quad (3.5)$$

O Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS), o Programa de Integração Social (PIS) e a Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social (COFINS) não são cobrados sobre o preço base da mercadoria ou serviço comercializados, pode-se multiplicar cada coeficiente para chega a um único coeficiente tributário. Os valores utilizados no modelo seguem os dados apresentados na Tabela 3.2:

Tabela 3.2: Alíquotas de Impostos

Imposto	Alíquota	Multiplicador
ICMS	30%	1,42857
PIS	0,95%	1,00959
COFINS	4,45%	1,04657

Fonte: Elaboração própria baseado no dados da COPEL (2019).

No caso do preço de venda da energia gerada pelos consumidores foi proposta a equação linear 3.6:

$$P_{i,h,t,a}^G = \beta_1 + \beta_2 P_{i,h,t,a}^C \quad (3.6)$$

Na Equação 3.6, o preço de venda da energia gerada é representado por $P_{i,h,t,a}^G$ sendo i cada uma das famílias e h, t, a ao momento no tempo. Já β_1 e β_2 são parâmetros de ajustamento linear entre a variável $P_{i,h,t,a}^G$ e $P_{i,h,t,a}^C$. No caso em que β_1 é 0 e β_2 é 1, o preço de compra da energia é igual ao preço de venda e esse cenário representa o que ocorre no Brasil atualmente. No caso de β_2 ser 0 e considerar um valor determinado para β_1 pode-se simular a política de preço de compra de energia do governo alemão que fixa um valor por um determinado período para garantir estabilidade nos preços e tornar os sistemas fotovoltaicos mais atrativos para os consumidores.

3.5 O CONSUMO DE ENERGIA PELAS FAMÍLIAS E A RENDA

Toda a residência na cidade começa a consumir uma quantidade de energia dependendo do seu nível de renda, comprando toda a energia do mercado e sem produção de energia. Desde modo a demanda de energia pode variar ciclicamente durante o dia, a demanda (carga) por parte das famílias é calculada a cada hora e acumulada, assumindo a soma diária como sendo: $C_i^{dia} = \sum_{h=1}^{24} C_{i,h,t,a}(Y_i)$. Considerando isso como um dia representativo no mês, pode-se calcular a carga mensal (tempo t) pela seguinte equação:

$$C_{i,t,a}^{mes} = 30 \times \sum_{h=1}^{24} \left[\bar{C}_{i,h,t,a}(\bar{Y}_i) + e_{i,h,t,a}^3 \right] \quad \text{onde} \quad e_{3,t}N \sim (0, \sigma_{i,h,t,a}^3) \quad (3.7)$$

onde, $C_{i,t,a}^{mes}$ é o consumo em kW/h de um domicílio com renda média de \bar{Y}_i . Além disso, cada família tem heterogeneidade no seu consumo de energia, por isso é adicionado um choque aleatório com distribuição normal em cada hora do seu consumo. Já o consumo horário $C_{i,h,t,a}$ de cada família é descrito por:

$$C_{i,h,t,a} = \bar{C}_{i,h}(\bar{Y}_i) + e_{i,h,t,a}^3 \quad \text{onde} \quad e_{3,t}N \sim (0, \sigma_{i,h,t,a}^3) \quad (3.8)$$

Para definir as rendas \bar{Y}_i do modelo, foi utilizado a definição do IBGE como base:

Tabela 3.3: Classes Sociais

Faixa de renda- R\$	Classe
≥ 18.740	A
9.370 - 18.740	B
3.748 - 9.370	C
1.874 - 3.748	D
0 - 1.874	E

Fonte: Adaptado de FGV (2014).

Para chegar aos valores apresentados na Tabela 3.3 corrigiu-se os valores apresentados por FGV (2014), em relação ao salário mínimos vigente em 2018. Os valores da renda das famílias no modelo foram criados com base no valor médio de cada intervalo de classe social proposto, mas como a classe de renda A não possui limite superior foi considerado o valor de 28.110,00 reais como valor médio. Eles foram normalmente distribuídos e o valor do seu desvio padrão é a metade do valor entre a média de cada grupo e o limite inferior do intervalo proposto. Dessa forma 95% das famílias em cada classe estarão dentro dos intervalos de renda apresentados pelo, mas não existir famílias que mesmo com uma renda maior ou menor que o intervalo antes proposto, estarão dentro de outra determinada classe social.

$$Y_i = N \sim (\bar{Y}_c, \sigma^c) \quad (3.9)$$

Neste caso Y_i é a renda da família i , \bar{Y}_c é média da renda da classe social c e σ^c é desvio padrão da classe social c .

A Tabela 3.4 mostra a renda média e o desvio padrão de cada classe social utilizada no modelo.

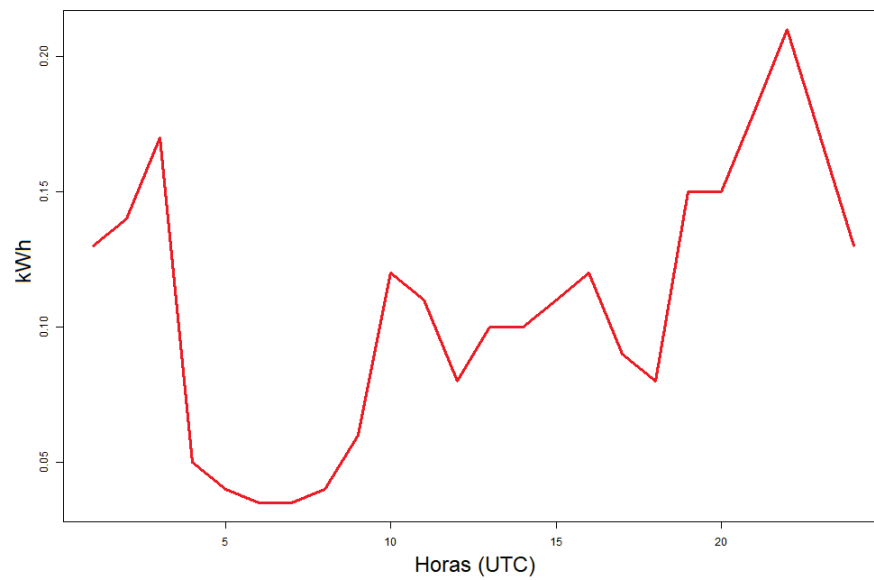
Tabela 3.4: Renda das Famílias

Classe Social	Renda Média	Desvio Padrão
A	28110,00	4685
B	14055,00	2342
C	6559,00	3279
D	2811,00	468
E	937,00	468

Fonte: Elaborado a partir da tabela 3.3.

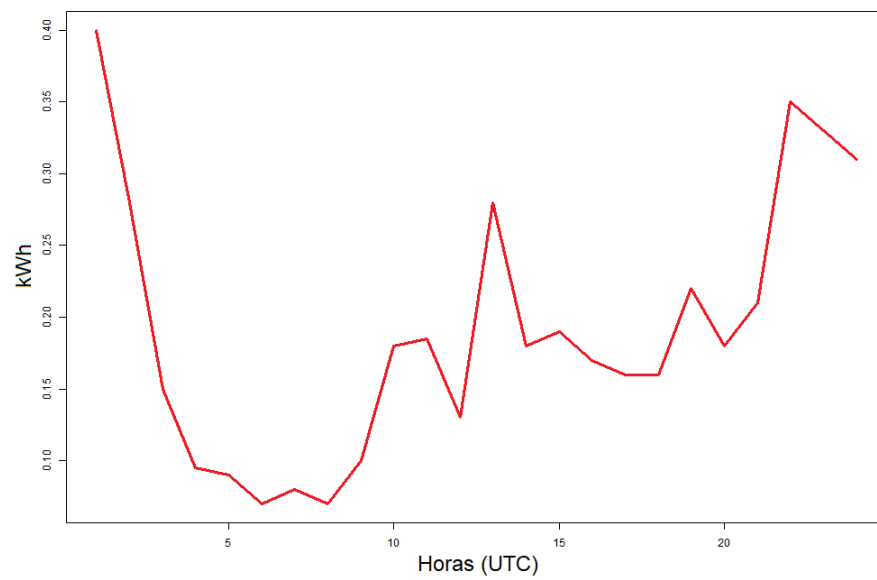
Voltando ao consumo de energia de cada família, os dados utilizados foram baseados no estudo de Francisquini (2006), que estimou o consumo médio horário das residências brasileiras dividindo-as em 5 diferentes faixas, como é apresentado nas figuras 3.4, 3.5, 3.6, 3.7 e 3.8:

Figura 3.4: Carga Média das Famílias que Consomem menos de 100 kWh/mês



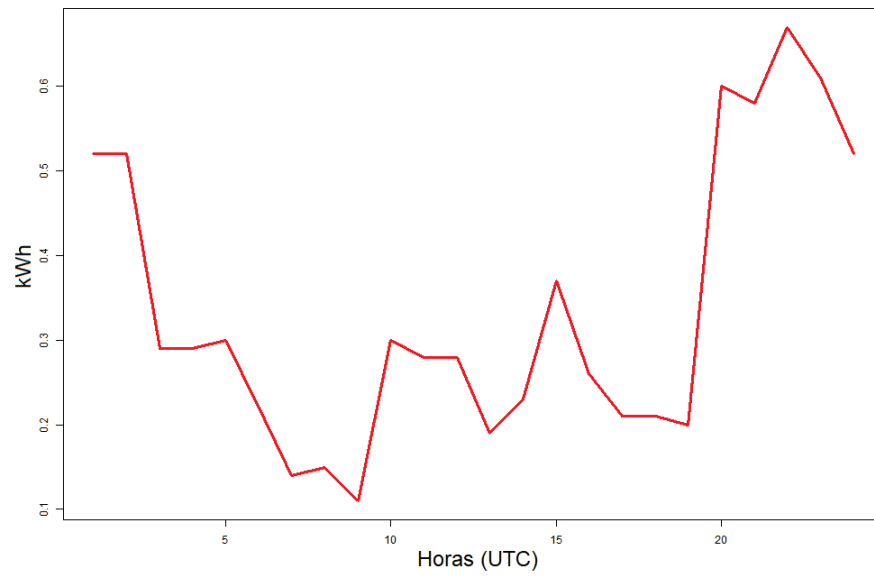
Fonte: Adaptado de Francisquini (2006).

Figura 3.5: Carga Média das Famílias que Consomem entre 101 e 200 kWh/mês



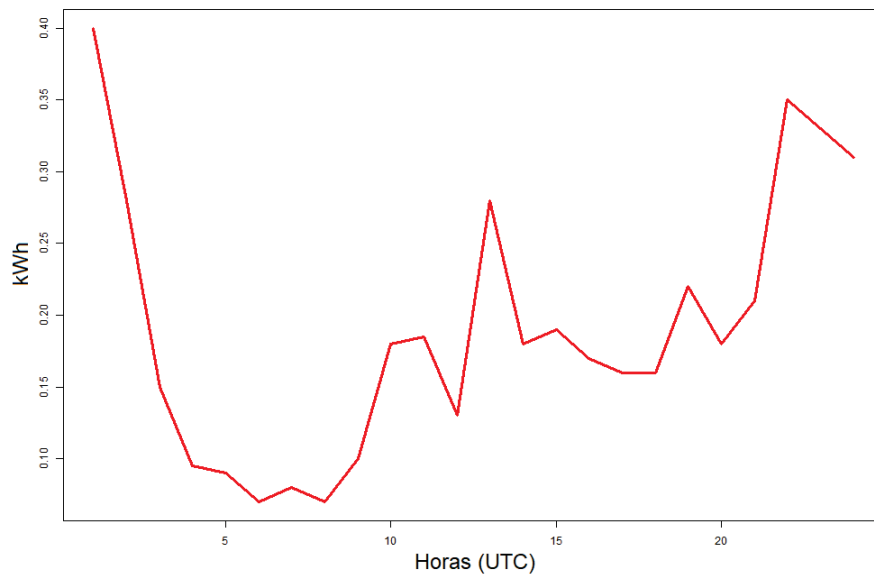
Fonte: Adaptado de Francisquini (2006).

Figura 3.6: Carga Média das Famílias que Consomem entre 201 e 300 kWh/mês



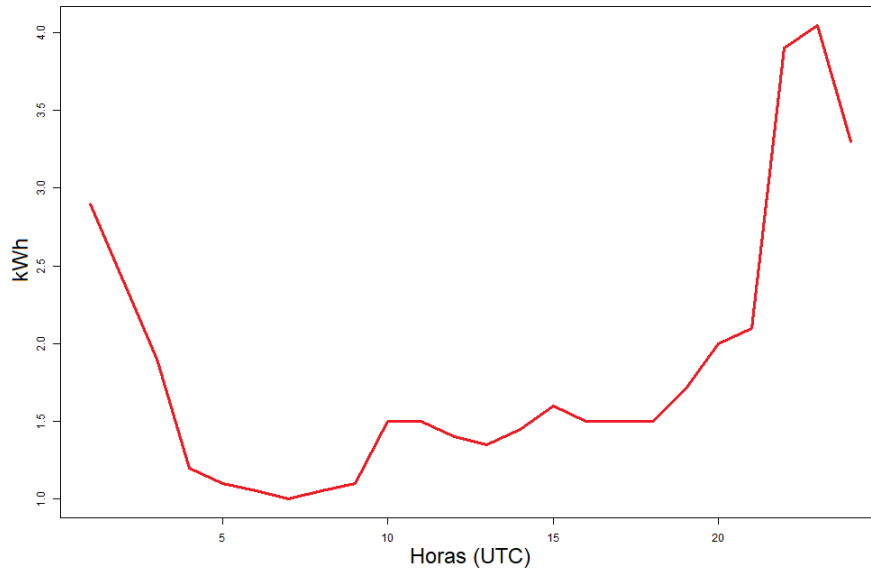
Fonte: Adaptado de Francisquini (2006).

Figura 3.7: Carga Média das Famílias que Consomem entre 301 a 500 kWh/mês



Fonte: Adaptado de Francisquini (2006).

Figura 3.8: Carga Média das Famílias com o Consumo maior que 500 kWh/mês



Fonte: Adaptado de Francisquini (2006).

Foi considerado nessa dissertação que as 5 classes sociais tem equivalência às 5 curvas propostas por Francisquini (2006) dessa forma $\bar{C}_{i,h,t,a}$ depende da classe social da família, dos dados apresentados no trabalho do Francisquini e de um erro aleatório.

Quando o modelo é inicializado define-se qual será a classe social que habitará cada região, criando assim um efeito de heterogeneidade entre os bairros, mas certa homogeneidade dentro dos mesmo, como acontece nas cidades.

3.6 GERAÇÃO

Para o cálculo da geração de energia de cada residência adotante dos sistemas fotovoltaicos foi utilizado a normativa ANEEL nº 482/2012, que diz que os micro produtores de energia elétrica não podem ter retorno monetário com a venda de energia elétrica, o valor da produção é abatido na sua conta de energia elétrica e caso haja uma extrapolação da geração em relação ao consumo o micro produtor recebe um crédito que pode ser utilizado nos próximos 12 meses. Uma forma de representar isso para o caso brasileiro seria descrito pela Equação 3.10:

$$\sum_{t=1}^{12} C_{i,t,a}^{mes} = \sum_{t=1}^{12} 30 \sum_{h=1}^{24} G_{i,h,t,a} \quad (3.10)$$

Mas como o modelo considera que possa existir descolamento entre $P_{i,h,t,a}^C$ e $P_{i,h,t,a}^G$ seria necessário ponderar pelos preços para garantir essa igualdade. Dessa forma tem-se a equação 3.11:

$$\sum_{t=1}^{12} 30 \times \sum_{h=1}^{24} (C_{i,h,t,a} P_{i,h,t,a}^C) = \sum_{t=1}^{12} 30 \times \sum_{h=1}^{24} (G_{i,h,t,a} P_{i,h,t,a}^G) \quad (3.11)$$

Como os indivíduos não podem prever sua carga e nem a geração, consideram então as esperanças dessa igualdade, mostrado pelas equações 3.12 e 3.13:

$$30 \times E \left(\sum_{t=1}^{12} \sum_{h=1}^{24} (C_{i,h,t,a} P_{i,h,t,a}^C) \right) = 30 \times E \left(\sum_{t=1}^{12} \sum_{h=1}^{24} (G_{i,h,t,a} P_{i,h,t,a}^G) \right) \quad (3.12)$$

ou

$$\sum_{t=1}^{12} \sum_{h=1}^{24} (E(C_{i,h,t,a}) E(P_{i,h,t,a}^C)) = \sum_{t=1}^{12} \sum_{h=1}^{24} (E(G_{i,h,t,a}) E(P_{i,h,t,a}^G)) \quad (3.13)$$

Aplicando a esperança nas equações 3.3, 3.6 e 3.8 e substituindo na equação 3.11 encontra-se a equação 3.14:

$$12 \sum_{h=1}^{24} \bar{C}_{i,h} P_{i,h,t,a}^C = \sum_{t=0}^{11} \sum_{h=1}^{24} (E(G_{i,h,t,a}) P_{i,h,t,a}^G) \quad (3.14)$$

O próximo passo é calcular a quantidade de energia a ser gerada por uma família após decidir adotar a nova tecnologia $G_{i,t}$. Neste modelo é considerado a seguinte equação de geração de energia fotovoltaica apresentada por Luque e Hegedus (2003):

$$G_{i,h,t,a} = k_{i,a} \left(\frac{R_{h,t,a}}{1000W} \right) [1 - 0,0045(T_{h,t,a}^{mod} - 25)] \quad (3.15)$$

Na equação 3.15, $G_{i,h,t,a}$ representa a potência gerada pela família i no tempo (h,t,a) . Já $k_{i,a}$ é a capacidade instalada medida em kilowatt-pico (kWp) ¹ pela família i , $T_{h,t,a}^{mod}$ é a temperatura do módulo no tempo (h,t,a) e $R_{h,t,a}$ é a irradiação solar apresentada na equação 3.2. Em seu trabalho, Luque e Hegedus (2003), apresentam a relação entre a capacidade instalada, irradiação solar, temperatura e a potência medida gerada pelos sistemas fotovoltaicos.

$T_{h,t,a}^{mod}$ pode ser aberta na equação 3.16:

$$T_{h,t,a}^{mod} = T_{h,t,a} + T_{h,t,a}^{op} \quad (3.16)$$

onde, $T_{h,t,a}$ é a temperatura da cidade na hora h , no mês t e no ano a como foi apresentado na equação 3.1, já $T_{h,t,a}^{op}$ é a temperatura acima da temperatura ambiente em que os módulos fotovoltaicos operam.

Como Silva (2016) apresenta em seu trabalho, uma estimativa conservadora é que os módulos operem 40° acima da temperatura ambiente dessa forma, são obtidas as equações 3.17 e 3.18:

$$G_{i,h,t,a} = k_{i,a} \left(\frac{R_{h,t,a}}{1000W} \right) [1 - 0,0045(T_{h,t,a} + 40 - 25)] \quad (3.17)$$

$$G_{i,h,t,a} = k_{i,a} \left(\frac{R_{h,t,a}}{1000W} \right) [1 - 0,0045(T_{h,t,a} + 15)] \quad (3.18)$$

¹kWp é uma medida de potência energética, seu o valor é a potência medida gerada por um sistema que é irradiado por uma luz que simula a luz solar com a potência de 1000 W/m², à temperatura de 25 °C.

Calculando a $E(G_{i,h,t,a})$ chega na equação 3.19:

$$E(G_{i,h,t,a}) = k_{i,a} \left(\frac{\bar{R}_{h,t}}{1000W} \right) [1 - 0,0045(\bar{T}_{h,t} + 15)] \quad (3.19)$$

Para simplificar considerou-se:

$$\Omega_{h,t} = \frac{\bar{R}_{h,t}}{1000W} [1 - 0,0045(\bar{T}_{h,t} + 15)] \quad (3.20)$$

Então:

$$E(G_{t,i}) = k_{i,a} \Omega_{h,t} \quad (3.21)$$

Substituindo a equação 3.21 na equação 3.14, chega-se na equação 3.22:

$$12 \sum_{h=1}^{24} (\bar{C}_{i,h} P_{i,h,t,a}^C) = \sum_{t=1}^{12} \sum_{h=1}^{24} (k_{i,a} \Omega_{h,t} P_{i,h,t,a}^G) \quad (3.22)$$

Reescrevendo a equação:

$$k_{i,a} = \frac{12 \sum_{h=1}^{24} (\bar{C}_{i,t} P_{i,h,t,a}^C)}{\sum_{t=1}^{12} \sum_{h=1}^{24} (\Omega_{h,t} P_{i,h,t,a}^G)} \quad (3.23)$$

Com base no consumo médio horário familiar, nos preços, na temperatura e na irradiação solar horária média da região simulada é possível encontrar qual seria a capacidade instalada de cada família necessária para igualar a sua geração à carga. A capacidade instalada ($k_{i,a}$) só sofre alterações anuais, porque ela é uma estimativa da esperança do somatório dos valores Intra-anual e dos preços que contratualmente só sofrente mudanças anuais como foi visto na equação 3.3.

3.7 REGRAS DE COMPORTAMENTO

Como o modelo proposto nessa dissertação é um MBA, o comportamento dos agentes é central na sua construção. Nessa seção é apresentado como as famílias tomam a decisão de investir nos sistemas fotovoltaicos, avaliando o retorno financeiro que os módulos podem gerar para as mesmas, a influência das interações sociais, o seu nível de renda e o seu perfil de adoção de novas tecnologias.

3.7.1 Tomada de decisão

A cada mês dentro do modelo as famílias consideram uma série de fatores internos e externos a seu núcleo familiar para tomar a decisão de adquirir os sistemas fotovoltaicos em suas residências. Foi proposto nesse modelo a seguinte equação para sua tomada de decisão:

$$D_{i,t} = \alpha_1 \mathcal{F}_1(ROI_{i,t,a}) + \alpha_2 \mathcal{F}_2(Laços_{i,t,a}) + \alpha_3 \mathcal{F}_3(Renda_i) + \alpha_4 \mathcal{F}_4(Perfil_i) \quad (3.24)$$

Na equação 3.24, $D_{i,t}$ é a combinação linear de quatro fatores o Retorno sobre o investimento (ROI), os Laços Sociais (Laços), o nível relativo de renda (Renda) e o perfil de adoção de novas tecnologias (Perfil) são determinantes da família i na tomada de decisão de investir no sistema fotovoltaico no mês t . Os parâmetros $\alpha_{1...4}$ representam o peso que cada fator

da tomada de decisão tem dentro da equação. Já os $\mathcal{F}_{1...4}$ são as formas funcionais que cada parâmetro assume no modelo. As seções que se seguem tem o papel de explicar cada uma dessas formas funcionais.

Além disso:

$$\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4 \leq 1 \quad (3.25)$$

$$\mathcal{F}_1(ROI_{i,t,a}), \mathcal{F}_2(Laços_{i,t,a}), \mathcal{F}_3(Renda_i), \mathcal{F}_4(Perfil_i) = [0, 1] \quad (3.26)$$

Ao aplicar $D_{i,t}$ em uma equação logística é obtido:

$$P(D)_{i,t,a} = \frac{2}{1 + e^{-\theta_0 D_{i,t,a}^{\theta_1}}} - 1 \quad (3.27)$$

onde $P(D)_{i,t,a}$ é a probabilidade da família i , no mês t e no ano a , investir no sistema de geração fotovoltaica. Já θ_0 e θ_1 são coeficientes que alteram o formato da curva S gerado pela função exponencial. Para cada família i no tempo (t,a) é calculado uma variável $U_{i,t,a}^1$ uniformemente distribuída e $U_{i,t,a}^1 \in [0, 1]$, compara-se o valor de $P(D)_{i,t,a}$ com o valor de $U_{i,t,a}^1$:

$$f(n)_{i,t} = \begin{cases} 0, & \text{se } P(e)_{i,t} \leq U_{i,t,a}^1 \\ 1, & \text{se } P(e)_{i,t} > U_{i,t,a}^1 \end{cases} \quad (3.28)$$

Caso $f(n)_{i,t,a}$ seja igual a zero a família i no tempo (t,a) não compra o sistema fotovoltaico, mas se $f(n)_{i,t,a}$ for igual a 1 quer dizer que a família i no tempo (t,a) adquire para sua residência um sistema fotovoltaico. Começando assim a gerar energia alimentando a rede além de consumir.

$$K_{i,t,a}^e = f(n)_{i,t,a} k_{i,a} \quad (3.29)$$

onde, $K_{i,t,a}^e$ é a capacidade instalada efetiva de cada família i no tempo (t,a) , ou seja, na equação 3.23 definiu-se uma $k_{i,a}$ para igualar a geração e a carga, já na equação 3.29 essa capacidade instalada se torna efetiva caso a variável binária $f(n)_{i,t}$ seja igual a 1. Para calcular o custo da capacidade instalada é utilizada a seguinte equação:

$$P_{i,t,a}^K = (1 - \phi)(\beta_3 + \beta_4 K_{i,t,a}^e) \quad (3.30)$$

onde, ϕ representa o subsídio que o governo pode oferecer para facilitar a compra dos sistemas fotovoltaicos pelas famílias, $P_{i,t,a}^K$ é o custo da família i para instalar o sistema fotovoltaico no período (t,a) , β_3 e β_4 são parâmetros lineares da relação entre as duas variáveis. Como simplificação para calcular os custos de instalação do sistema fotovoltaico foi proposto no modelo uma forma linear da relação entre os custos de implementação do sistema e capacidade instalada.

No Brasil, o custo de um sistema de energia solar fotovoltaico depende de vários fatores, principalmente da localização, das dimensões do sistema e da complexidade da instalação. A grande variação dos preços entre os diversos fornecedores estão relacionadas à qualidade dos componentes utilizados e do porte da empresa. Em junho de 2018, de acordo as pesquisas realizadas pela Solar (2018) com mais de 4.500 empresas do setor foi obtido para a instalação completa dos sistemas fotovoltaicos de uso residencial no Brasil os seguintes valores:

Tabela 3.5: Preço dos Sistemas Fotovoltaicos no Brasil por kilowatt-Pico Instalado

kWp	Preço em R\$
0,66	5960,46
1,32	10673,36
1,98	12920,00
2,64	17570,00
3,30	20320,00
3,96	22625,00
4,62	25695,00
5,28	27360,00
5,94	30844,00
6,60	32410,00
7,26	37555,00
7,92	39324,00
8,58	44878,00
9,24	46466,00
9,90	48095,50
10,56	52240,00
12,54	61623,00

Fonte: (Solar, 2018).

Com base nos dados apresentados na Tabela 3.5, foi estimado uma regressão linear da relação entre o preço de instalação do sistema e o kilowatt-pico instalado, com esse resultado foi possível estimar β_3 e β_4 , parâmetros da equação 3.30, como sendo 4.256,09 e 4.537,69 respectivamente.

3.7.2 Retorno sobre o Investimento

Como os sistemas fotovoltaicos apresentam características de um bem de capital, ou seja, existe no consumo não só a satisfação do desejo de consumir, mas um retorno econômico ligado ao uso bem, as famílias ao tomarem a decisão de investir nesse bem devem considerar o retorno que o sistema pode gerar economicamente.

Nesse modelo foi proposto que os indivíduos analisem o retorno que essa tecnologia pode gerar ao decorrer dos anos, dado o custo do investimento. Dessa forma foi considerado o ROI conforme a equação 3.31:

$$ROI = \frac{Ganho - Custo}{Custo} \quad (3.31)$$

O ROI é um coeficiente que mede quantas vezes o ganho líquido é maior que o custo do investimento.

Para o cálculo do ganho obtido com a adoção dos sistemas fotovoltaicos foi considerado um prazo de 20 anos que é uma estimativa da vida útil da tecnologia, e o quanto a família deixaria de gastar com as contas de energia no prazo de 20 anos. Esse valor é calculado com base no valor presente líquido, ou seja, desconta-se a inflação r para cada período e se estima quanto o ganho nos 20 anos representam em valores correntes, conforme a equação 3.32:

$$Ganho_{i,t} = \sum_{g=0}^{19} \left(\frac{30 \times \sum_{t=1}^{24} (\hat{P}_{i,h,t,a}^C E(C_{i,h,t,a}))}{(1+r)^g} \right) \quad (3.32)$$

Para esse cálculo as famílias utilizam o preço corrente no tempo t , nesse caso é utilizado o preço com os impostos ao consumidor, pois aqui é calculado o total que as famílias podem poupar nos 20 anos. No caso do consumo as famílias não sabem ao certo quanto vão consumir em cada mês, dessa forma elas trabalham com a esperança do consumo, ou seja, ela não considera as possíveis flutuações no consumo residencial.

$$Ganho_{i,t,a} = \sum_{g=0}^{19} \left(\frac{30 \times \sum_{t=1}^{24} (\hat{P}_{i,h,t,a}^C \bar{C}_{i,h,t,a})}{(1+r)^g} \right) \quad (3.33)$$

O cálculo do valor presente líquido é aplicado apenas nos ganhos, pois o modelo assume que as famílias investem o dinheiro apenas no período (t,a) , não existindo assim a possibilidade de financiamento dos custos.

$$ROI_{i,t,a} = \frac{\sum_{g=0}^{19} \left(\frac{30 \times \sum_{t=1}^{24} (\hat{P}_{i,h,t,a}^C \bar{C}_{i,h,t,a})}{(1+r)^g} \right) - P_{i,t,a}^K}{P_{i,t}^K} \quad (3.34)$$

Como a $ROI_{i,t,a}$ é um coeficiente que pode variar de fora do intervalo $[0,1]$, aplicou-se então uma curva logística parametrizada para restringir esse valor entre $[0,1]$. Foi utilizado uma curva logística pelo fato de que quanto maior o retorno, maior será a atratividade do investimento até o ponto que o retorno já é suficientemente alto ao ponto de que a atratividade do retorno não cresça na mesma proporção do próprio retorno.

$$\mathcal{F}_1(ROI_{i,t,a}) = \frac{1}{1 + \gamma_2 e^{-\gamma_3(ROI_{i,t,a} - \gamma_4)}} \quad (3.35)$$

Nesse caso γ_2 e γ_3 são parâmetros que determinam a concavidade e a inclinação da curva. Já γ_4 representa o ROI de um segundo ativo no qual a família o compara ao sistema fotovoltaico para tomar sua decisão, pode se entender como um ativo livre de risco dessa economia.

3.7.3 Laços Sociais

Como foi discutido no capítulo (2), para entender o comportamento de difusão tecnológica é importante entender os indivíduos embebidos em sociedade, ou seja, os indivíduos sendo influenciados e influenciando na tomada de decisão uns dos outros. Para criar esse efeito criou-se no modelo uma rede de laços sociais que cada indivíduo pode se ligar a outros e eles podem trocar informações por essa rede. Para isso considerou-se a equação 3.36:

$$P(Laços_{i,j}) = \frac{\gamma_1}{Dist^{\gamma_2}} \quad (3.36)$$

onde $P(Laços_{i,t})$ é a probabilidade da família i criar um laço social com a família j . Essa probabilidade depende de dois parâmetros o γ_1 que tem um efeito linear sobre a distância e γ_2 que tem um efeito exponencial, além d $Dist$ a distância entre as residências das famílias. Como as ela são distribuídas com rendas similares dentro dos mesmos bairros, é provável que os laços sociais sejam criados com famílias que apresentem o mesmo padrão de renda ou mais similares ao seu. Para cada vez que a variável $P(Laços_{i,j})$ é calculada também se calcula uma variável $U_{i,j}^2$ uniformemente distribuída e $U_{i,j}^2 \in [0, 1]$, compara-se o valor de $P(Laços_{i,j})$ com o valor de $U_{i,j}^2$

caso $P(Laços_{i,j})$ apresente um resultado, maior então cria-se um laço entre a família i e a família j . A variável $Dist$ é descrita pela equação 3.37:

$$Dist = \sqrt{[(D_{x,i} - D_{x,j})^2 + (D_{y,i} - D_{y,j})^2]} \quad (3.37)$$

A distância é calculada com base na distância euclidiana entre as residências das famílias, $V_{y,i}$ representa a coordenada do eixo vertical do agente i , e $D_{x,i}$ representa a coordenada do eixo horizontal em relação ao agente i , $D_{y,j}$ e $D_{x,j}$ representam o mesmo para o indivíduo j . Como os agentes são gerados em um plano, é mais provável que os agentes criem laços com outros agentes mais próximos, mas como são simulados 3.840 famílias algumas acabam-se conectando com indivíduos mais longe, desta forma cria-se o efeito de *Small World* visto na Seção 2.4.

Neste modelo as famílias têm uma rede social fixa durante todas as interações, uma vez que a mesma é criada no início da simulação. Dessa forma o que será analisado é a densidade da rede em relação a quem possui o sistema fotovoltaico em relação aos totais de laços de cada família.

$$\mathcal{F}_2(Laços_{i,t,a}) = \frac{L_{i,t,a}^{tec}}{L_i^T} \quad (3.38)$$

Nesse caso $L_{i,t,a}^T$ é o total de laços com outras famílias que a família i possui no tempo (t,a) , $L_{i,t,a}^{tec}$ é o total de laços da família i com outras famílias que possuem o sistema fotovoltaico no tempo (t,a) . Quanto mais famílias com os sistemas fotovoltaicos estiverem em sua rede maior será o efeito social sobre essa família, a equação 3.38 representa essa relação:

$$\text{Se } L_{i,t,a}^{tec} = 0 \text{ então, } \mathcal{F}_2(Laços_{i,t,a}) = 0 \quad (3.39)$$

A equação 3.39 apresenta que caso a família i não se conectar a nenhuma das outras 3.839 famílias j então, $\mathcal{F}_2(Laços_{i,t,a}) = 0$.

3.7.4 Renda

A decisão de compra do painel está relacionada a renda de cada família i , quanto mais alto é o seu nível de renda, maior será a chance de comprar o sistema fotovoltaico. Para criar um índice de renda relativo dividi-se a renda da família Y_i pela renda da família com o maior nível de renda Y_{max} , dessa forma chega-se na equação 3.40:

$$\mathcal{F}_3(Renda_i) = \frac{Y_i}{Y_{max}} \quad (3.40)$$

3.7.5 Perfil

Por fim, o modelo considera que cada núcleo familiar possui um perfil a respeito do consumo de inovações tecnológicas. Com base na divisão de Rogers e Shoemaker (1971) as famílias foram divididas em 5 grupos. O grupo com o maior perfil de susceptibilidade a inovações são os inovadores, o segundo grupo nessa ordem são os adotantes iniciais que também têm um perfil de adoção de inovação, mas não tão alto quanto os inovadores. Depois desse grupo vem a maioria inicial, que segundo Rogers é o grupo com o maior número de indivíduos junto com a maioria tardia que vem logo depois deles. Por fim, o grupo que é menos susceptível as inovações são os retardatários que costumam ser o último grupo a adotar a inovação. Cada família i recebe um $Perfil_i$ que varia de 1 a 5, sendo 1 os inovadores, 2 os adotantes iniciais, 3 a maioria inicial,

4 a maioria tardia e 5 os retardatários. Por isso $\mathcal{F}_4(Perfil_i)$ é calculado com base na equação 3.41:

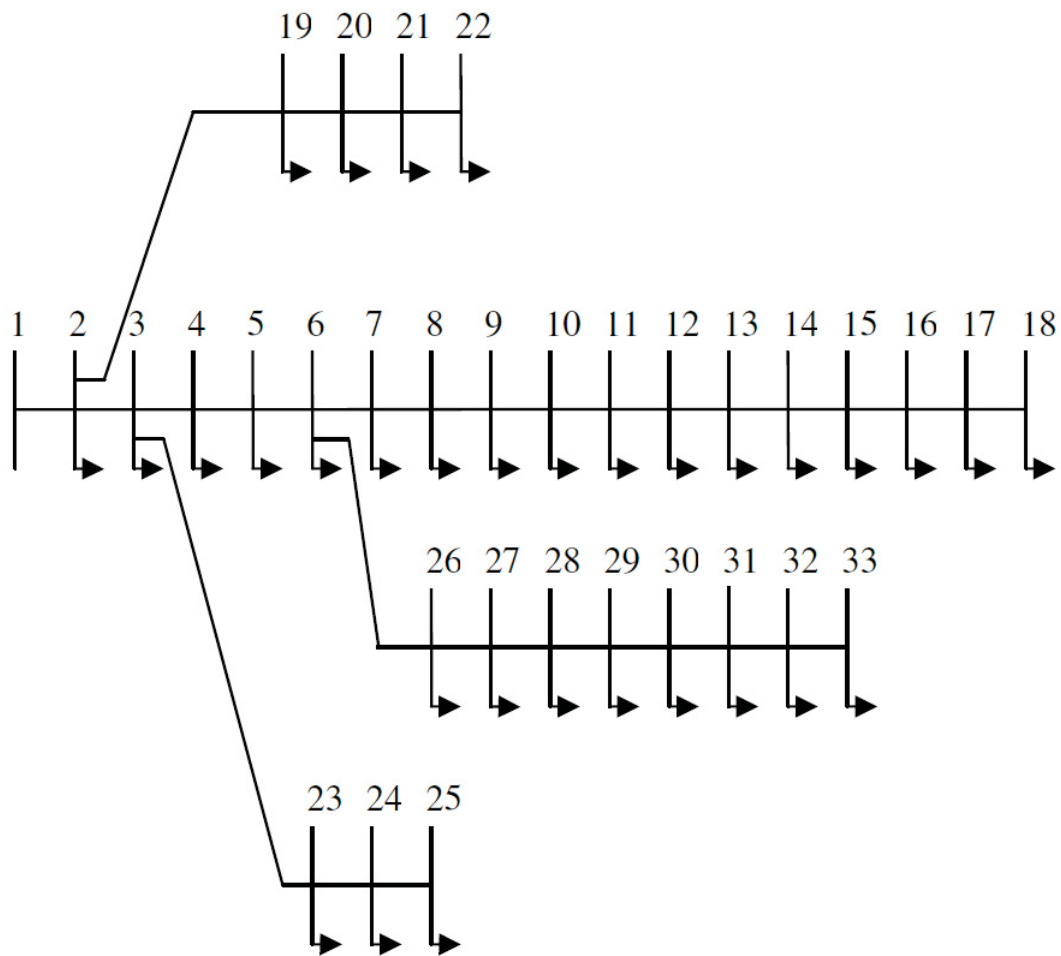
$$\mathcal{F}_4(Perfil_i) = \frac{1}{Perfil_i} \quad (3.41)$$

No Capítulo 4 serão testados diferentes distribuições de perfis entre os indivíduos da cidade estilizada e será analisado os impactos das distribuições na difusão dos sistemas.

3.8 REDE ELÉTRICA

Para simular a rede de distribuição do sistema elétrico na cidade proposta no modelo, utilizou-se o sistema IEEE 33 barras que possui topologia radial de tamanho médio, sem laços fechados e 32 linhas, cujo diagrama unifilar é apresentado na Figura 3.9. A tensão nominal do alimentador é 13,8 kV, além de ser um sistema trifásico equilibrado. Os dados das barras e das linhas utilizados nessa dissertação seguem no Apêndice B.

Figura 3.9: Diagrama do Alimentador de Distribuição IEEE 33 Barras



Fonte: Elaboração Própria.

Cada barra com uma seta representa um ponto de carga do sistema. Na cidade simulada e cada barra é por analogia o transformador de cada região. É uma simplificação, mas para

integrar as metodologias se fazem válidas. A primeira barra é chamada barra de referência, ela garante que o sistema se mantenha equilibrado, caso haja uma redução na carga ou um aumento na geração distribuída a barra de referência altera o seu valor para manter o equilíbrio no sistema. No caso do modelo a barra de referência se comporta como se fosse o resto do Sistema Elétrico Nacional, ou seja, a parte do sistema representado é atomizado em relação ao todo, quando é necessário a barra de referência absorve o excedente de energia da rede ou fornece, garantindo assim a estabilidade do sistema.

Como foi apresentado na Figura 3.9 as barras com setas representam as entradas de carga do sistema, cada uma está ligada a 120 famílias e o consumo dessas famílias somadas são a carga horária naquela barra. A medida que as famílias adotam os sistemas fotovoltaicos nas suas residências, aos poucos as barras podem passar também a gerar energia no sistema. Para avaliar os impactos na rede utilizou-se no modelo uma análise de fluxo de potência.

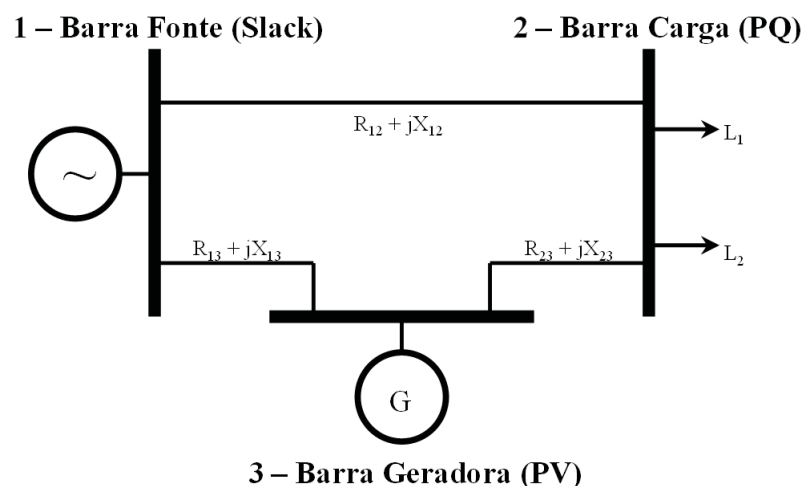
3.8.1 Fluxo de potência

Diversos métodos de solução estão presentes na literatura para a resolução deste problema (Grainger e Stevenson, 1994), como o método Gauss-Seidel, Newton-Raphson e o desacoplado rápido. No presente trabalho será abordado e discutido o método de Newton-Raphson.

Este é um método iterativo de aproximação de um conjunto de equações simultâneas não lineares a um conjunto de equações lineares usando a expansão da série de Taylor e limitando os termos à sua primeira aproximação. A sua grande vantagem é que se o valor assumido estiver próximo da solução considerada correta, o resultado sempre será obtido muito rapidamente, mas se o valor assumido ficar mais distante desta solução, o método poderá levar mais tempo para convergir Glover et al. (2002).

Para a resolução do problema de fluxo de potência através do método de Newton-Raphson, o sistema deve ser representado basicamente conforme mostrado no diagrama simplificado da Figura 3.10:

Figura 3.10: Diagrama Simplificado para Fluxo de Potência



Fonte: Adaptado (Lagacé, 2012).

Considerando a Figura 3.10, uma barra é um ponto ou nó, no qual uma ou várias linhas de transmissão, cargas e geradores estão conectados. Em um estudo de sistema de potência, cada barramento está associado a 4 grandezas que são: magnitude de tensão ($|V|$), ângulo de tensão de fase (δ), potência ativa (P) e potência reativa (Q) (Elgerd e Happ, 1972). Duas dessas

grandezas de barramento são especificadas e as duas restantes devem ser determinadas através da solução das equações de fluxo (Elgerd e Happ, 1972). As barras do sistema são classificadas dependendo das duas grandezas conhecidas que foram especificadas sendo divididas em três categorias, conforme mostrado na Tabela 3.6:

Tabela 3.6: Relação de Parâmetros para os Tipos de Barra

Tipos de barra	Parâmetros conhecidos	Parâmetros desconhecidos
Barra de Referência	V, δ	P, Q
Barra Geradora	$P, V $	Q, δ
Barra Carga	P, Q	V, δ

Adaptado de Stevenson, 1994

A barra de Referência é utilizada para atender à condição de equilíbrio de potência. No modelo ela representa as fontes primárias de energia que alimentam a cidade. Este barramento é geralmente uma unidade que pode ser ajustada para absorver ou fornecer o que for necessário para garantir a potência balanceada. A geração deste barramento também tem a função de fornecer as perdas para a rede.

As barras *PV* são conhecidas por realizar o controle de tensão do sistema. Nestas barras são conectadas unidades geradoras, nas quais a potência de saída gerada possa ser controlada ajustando-se a força motriz da máquina girante e a tensão possa ser controlada ajustando-se a excitação do gerador. Frequentemente, limites são dados aos valores das suas potências reativas, dependendo das características individuais da máquina (Milano, 2009).

As barras *PQ* são aquelas que não possuem geração, possuindo apenas carga ativa e reativa para injetar ou consumir no sistema elétrico. Nestas barras é convencionalizado que a energia reativa injetada é positiva, enquanto a energia consumida no sistema elétrico é negativa (Milano, 2009).

No início dos cálculos elétricos, as variáveis desconhecidas de cada barra assumem alguns valores iniciais, sendo eles:

- a) Geradores: assumem $\delta = 0$
- b) Cargas: assumem $V = 1$ p.u., $\delta = 0$
- c) Referência: não assumem nada

Após a definição dos valores iniciais de cada barra, a matriz de admitância é usada para escrever as equações para as injeções de correntes no sistema elétrico, conforme à seguinte correlação:

$$I_i = \sum_{j=1}^n |Y_{i,j}| |V_j| \leq \theta_{i,j} + \delta_j \quad (3.42)$$

A potência ativa e reativa no barramento *i* é dada então pela equação:

$$P_i - jQ_i = |V_i| I_i \quad (3.43)$$

Substituindo-se a Equação (3.43) em (3.42):

$$P_i - jQ_i = |V_i| \leq -\delta_i \sum_{j=1}^n |Y_{i,j}| |V_j| \leq \theta_{i,j} + \delta_j \quad (3.44)$$

Separando-se as partes reais e imaginárias, encontra-se:

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i||V_j||Y_{i,j}| \cos(\theta_{i,j} - \delta_i + \delta_j) \quad (3.45)$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^n |V_i||V_j||Y_{i,j}| \sin(\theta_{i,j} - \delta_i + \delta_j) \quad (3.46)$$

As equações 3.45 e 3.46, representam um conjunto de equações não lineares em termos de $|V|$ em p.u e δ em radianos. Como as equações 3.42 e 3.43 são expansíveis através da Série de Taylor são considerando os valores iniciais definidos para os barramentos. Dessa forma, pode-se obter o seguinte conjunto de equações lineares:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^k \\ \vdots \\ \Delta P_n^k \\ \Delta Q_2^k \\ \vdots \\ \Delta Q_n^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\delta P_2^k}{\partial \delta_2} & \cdots & \frac{\delta P_2^k}{\partial \delta_n} & \frac{\delta P_2^k}{\partial |V_2|} & \cdots & \frac{\delta P_2^k}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\delta P_n^k}{\partial \delta_2} & \cdots & \frac{\delta P_n^k}{\partial \delta_n} & \frac{\delta P_n^k}{\partial |V_2|} & \cdots & \frac{\delta P_n^k}{\partial |V_n|} \\ \frac{\delta Q_2^k}{\partial \delta_2} & \cdots & \frac{\delta Q_2^k}{\partial \delta_n} & \frac{\delta Q_2^k}{\partial |V_2|} & \cdots & \frac{\delta Q_2^k}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\delta Q_n^k}{\partial \delta_2} & \cdots & \frac{\delta Q_n^k}{\partial \delta_n} & \frac{\delta Q_n^k}{\partial |V_2|} & \cdots & \frac{\delta Q_n^k}{\partial |V_n|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2 \\ \vdots \\ \Delta \delta_n \\ \Delta |V_2| \\ \vdots \\ \Delta |V_n| \end{bmatrix} \quad (3.47)$$

No conjunto de equações lineares 3.47, denominada matriz Jacobiana, o elemento da magnitude e do ângulo da tensão da barra de referência é omitido porque já são conhecidos Milano (2009). O restante dos elementos da matriz jacobiana são obtidos a partir das derivadas parciais das equações 3.45 e 3.46. A equação pode ser escrita da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j_1 & j_2 \\ j_3 & j_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (3.48)$$

Onde j_1, j_2, j_3 e j_4 são os elementos da matriz Jacobiana. A diferença entre os valores estimados e calculados são os termos ΔP_i^k e ΔQ_i^k , sendo representados pelas seguintes equações:

$$\Delta P_i^k = P^{pch} - P_i^k \quad (3.49)$$

$$\Delta Q_i^k = Q^{pch} - Q_i^k \quad (3.50)$$

Chegando-se então às novas estimativas para tensão nas barras, sendo:

$$\delta_i^{k+1} = \delta_i^k + \Delta \delta_i^k \quad (3.51)$$

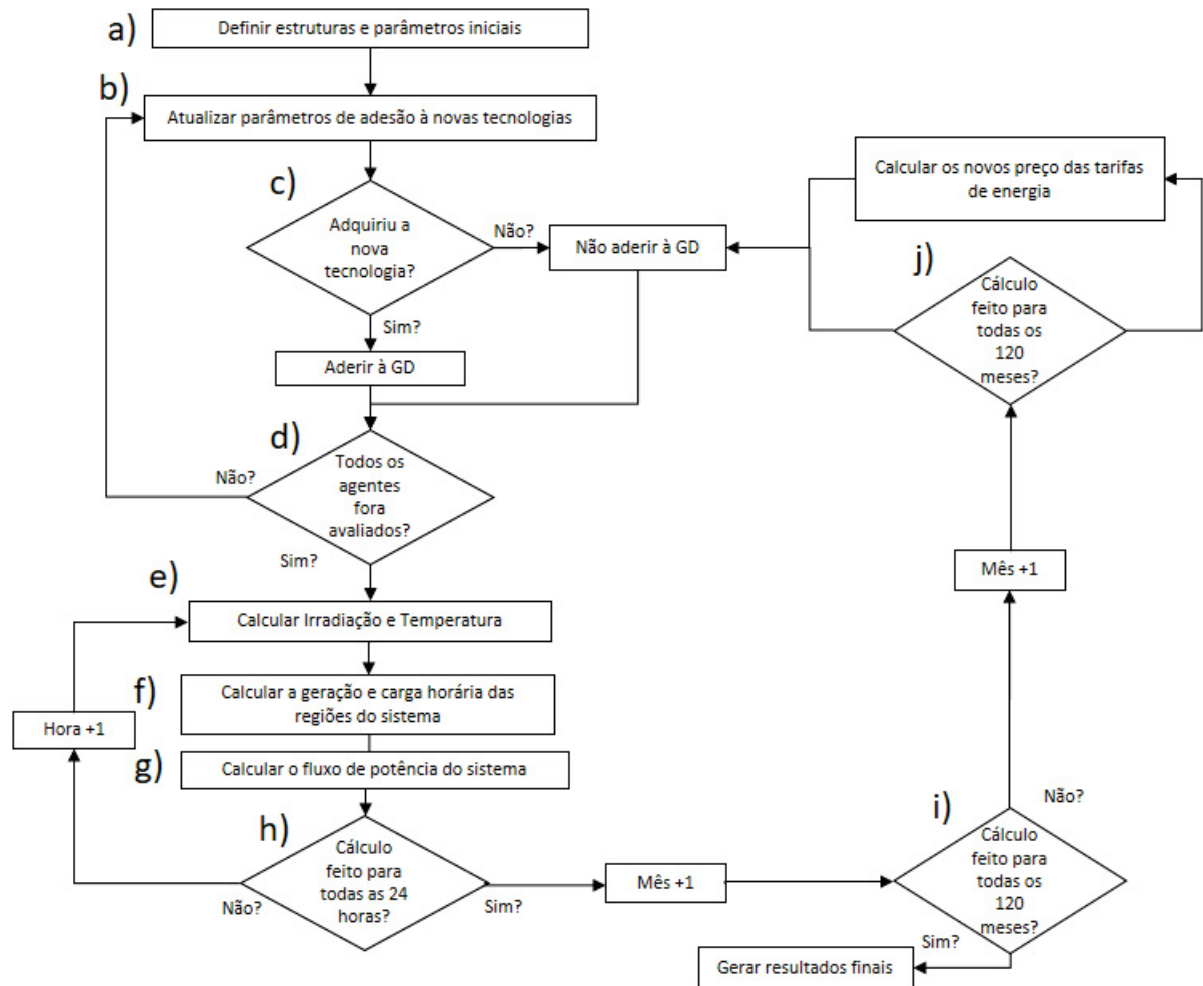
$$|V_i^{k+1}| = |V_i^k| + \Delta |V_i^k| \quad (3.52)$$

Após as inúmeras iterações utilizadas no método de cálculo, realiza-se a comparação entre duas soluções elétricas consecutivas verificando se a diferença entre elas está dentro do limite de tolerância preestabelecido (Glover et al., 2002).

3.8.2 Fluxograma do Processo de Difusão

O processo da difusão dos sistemas fotovoltaicos entre as residências da cidade simulada pode ser representado pelo fluxograma apresenta na figura 3.11:

Figura 3.11: Fluxograma



Fonte: Elaboração Própria.

- a) Inicialmente cria-se a estrutura que possibilite a execução do modelo, defini-se então geograficamente os bairros e as residenciais, adiciona-se as equações e mecanismos que permitirão que os indivíduos criem laços uns com os outros, consumam energia e tomem a decisão de gerar energia elétrica por via dos painéis fotovoltaicos. Além disso, defini-se os parâmetros exógenos do modelo e os elementos de heterogeneidade entre as famílias como, por exemplo, renda, nível de consumo de energia e quantidade de laços sociais com as outras famílias;
- b) nesse ponto são atualizados todos os parâmetros ligados a tomada de decisão de cada indivíduo. Calcula-se o ROI e todos as variáveis necessárias para isso, além das famílias atualizarem as percepções sobre as suas redes sociais;

- c) confere se o individuo que ainda não aderiu à geração distribuída irá nesse mês aderir, com base na equação 3.28;
- d) caso ainda não tenham sido analisado todos os indivíduos, reinicia-se o ciclo analisando cada um deles, do contrário, o modelo avança para o ciclo intradiário;
- e) computa-se a temperatura e a irradiação solar para aquela momento com base nas equações 3.1 e 3.2;
- f) com base no consumo de energia das famílias e na geração produzida pelos agentes que aderiram ao sistema fotovoltaico, calcula-se a carga e a geração em cada região da cidade;
- g) com dados gerados no passo g, calcula-se o fluxo de potência para aquela hora;
- h) nesse passo é conferido se as 24h do dia já foram simuladas, caso não tenham sido, reinicia-se o ciclo horário, do contrário, o modelo conclui mais um dia representativo e avança em um mês;
- i) como o modelo simula apenas 10 anos (120 mês) nesse passo existe um gatilho que para a simulação caso ela tenha completado os ciclos dos 10 anos e gera os resultados finais;
- j) como as tarifas de energia são calculadas anualmente, visto na equação 3.3, existe um gatilho que caso o modelo tenha completado um ciclo anual são recalculados os preços das tarifas, do contrário, o modelo recomeça atualizando os parâmetros das famílias em relação à tomada de decisão sem alterar os preços.

4 SIMULAÇÃO E RESULTADOS

Para verificar a dinâmica do modelo primeiramente é realizada uma simulação denominada de simulação base. O objetivo desta é avaliar se o modelo está bem especificado e se os parâmetros utilizados geram resultados compatíveis com os fatos estilizados. A partir dessa simulação, é possível a realização de modificações nos parâmetros com o objetivo de simular a adoção de políticas públicas. Os valores escolhidos para os parâmetros da simulação base podem ser observados na Tabela 4.1:

Tabela 4.1: Parâmetros da Simulação Base

Descrição	Parâmetros	Equações	Valores
Dimensões da Cidade			88×44 casas
Número de Famílias	F		3840
Número de Regiões	N		32
Parâmetro declividade dos Preços	β_0	3.3	0.70
Ponderação do ROI	α_1	3.24	0,175
Ponderação dos Laços Sociais	α_2	3.24	0,400
Ponderação da Renda	α_3	3.24	0,150
Ponderação do Perfil	α_4	3.24	0,150
Parâmetros da Rede Social	$\gamma_{1,2}$	3.36	0,40/3,0
Parâmetros Curva Logística do ROI	$\gamma_{3,4,5}$	3.35	15/2/0,05
Tipo de Tarifa			Comum
Parâmetros da relação entre os Preços	$\beta_{1,2}$	3.6	0/1
Parâmetros de preço dos Sistemas Fotovoltaicos	$\beta_{3,4}$	3.30	4256,09/4537,69
Subsídio	ϕ	3.30	0
Taxa de Juros %	r	3.32	0,05
Perfil			Rogers

Fonte: Elaboração Própria.

Além dos dados da Tabela 4.1, foram selecionados a correspondência de cada região uma entrada do sistema elétrico e um nível médio de renda para cada região. A distribuição de renda do modelo se baseia nos dados da Associação Brasileira de Empresas de Pesquisa (ABEP) de 2018. Cerca de 48% das famílias no Brasil se encontram na classe C, 28% estão situadas nas classes D e E e 24% das famílias estão nas Classes A e B (ABEP, 2018). Por simplificação considerou-se nesse modelo que as classes A e B representariam 25%, a classe C corresponde a 50% das famílias do modelo e as classes D e E juntas 25%, como pode ser visto na Tabela 4.2:

Tabela 4.2: Distribuição de Renda e Ligação na Rede Elétrica de cada Região do Modelo

Regiões	Classes Sociais	Barras
01/02/03/04	A	02/02/04/05
05/06/07/08	B	06/07/08/09
09/10/11/12	C	10/11/12/13
13/14/15/16	C	14/15/16/17
17/18/19/20	C	18/19/20/21
21/22/23/24	C	22/23/24/25
25/26/27/28	D	26/27/28/29
29/30/31/32	E	30/31/32/33

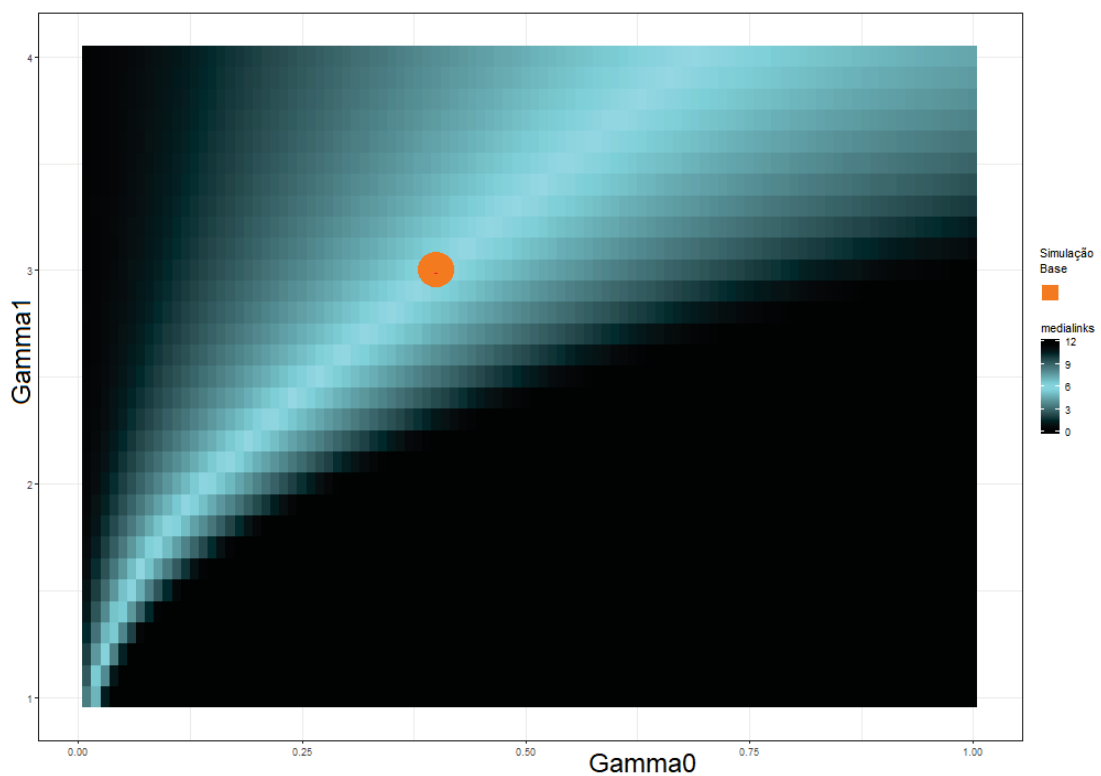
Fonte: Elaboração Própria.

4.1 SIMULAÇÃO BASE

Para garantir a robustez dos resultados cada configuração do modelo foi executada 100 vezes, num período correspondente a 10 anos, dentro do modelo, ou seja, os resultados apresentados são as médias das 100 simulações. O foco da análise será a difusão dos sistemas fotovoltaicos na cidade estilizada e a sua inserção nas diferentes classes sociais. Além disso, será analisado a evolução da capacidade instalada ao longo dos 10 anos, o investimento realizado pelas famílias e os impactos na rede elétrica da cidade.

Inicialmente para definir a quantidade média de laços sociais entre as famílias variaram-se os parâmetros γ_1 e γ_2 simultaneamente e avaliou-se quais seriam as possíveis combinações que retornariam uma taxa média de 6 laços por família. Na análise de sensibilidade 5.2 são avaliados também os casos para 4 e 8 laços em média por família.

Figura 4.1: Variação dos Parâmetros γ_1 e γ_2 que geram 6 Laços Sociais

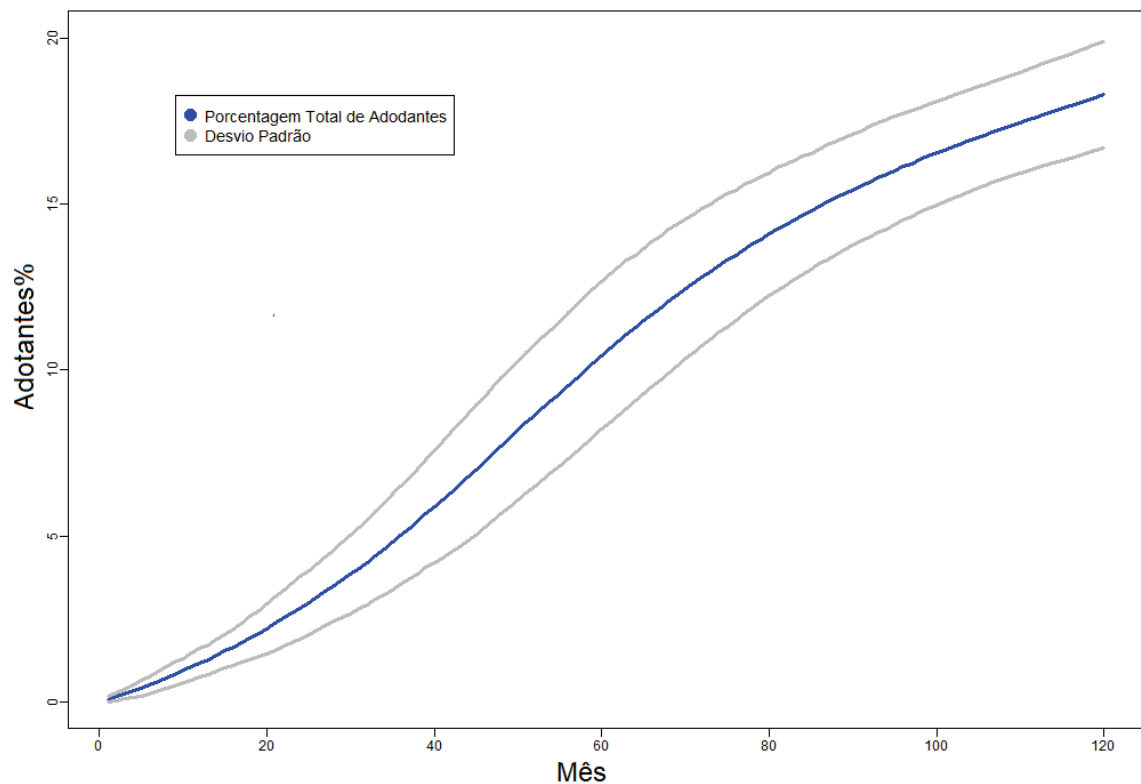


Fonte: Elaboração Própria.

Na Figura 4.1 é possível ver as possíveis combinações entre γ_1 e γ_2 que geram para as famílias uma média de 6 laços sociais. Essa análise é importante uma vez que os laços sociais têm o maior peso dentre as variáveis chaves na tomada de decisão. Dessa forma, a quantidade de laços sociais pode impactar diretamente os resultados do modelo. Uma vez que a rede social tem o papel de transmitir as informações entre as famílias, uma quantidade muito baixa ou muito alta de laços podem impactar diretamente na difusão da tecnologia.

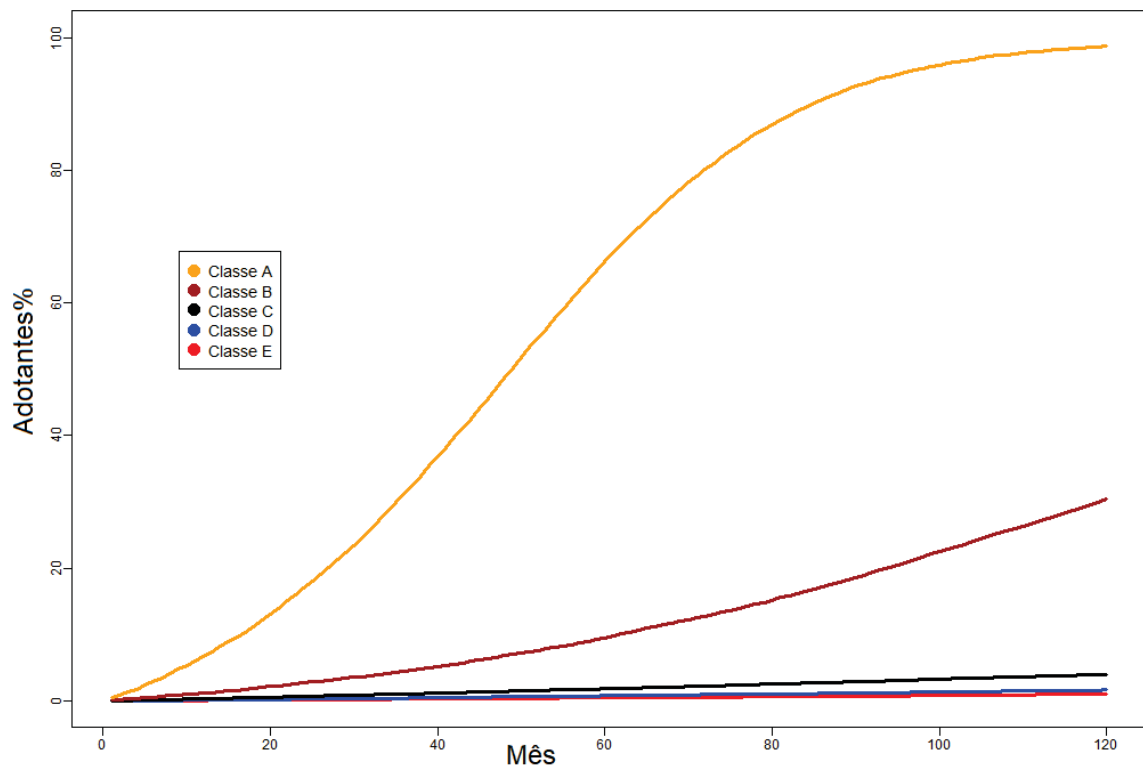
As Figuras 4.2 e 4.3 trazem as evoluções do número de adotantes dos sistemas fotovoltaicos ao longo dos 120 meses (10 anos). A Figura 4.2 mostra a porcentagem acumulada de famílias que adotaram os sistemas de geração solar. Com calibração do modelo cerca de 18,15% dos domicílios na cidade adotaram energia solar após 10 anos.

Figura 4.2: Total de Adotantes da Simulação Base



Fonte: Elaboração Própria.

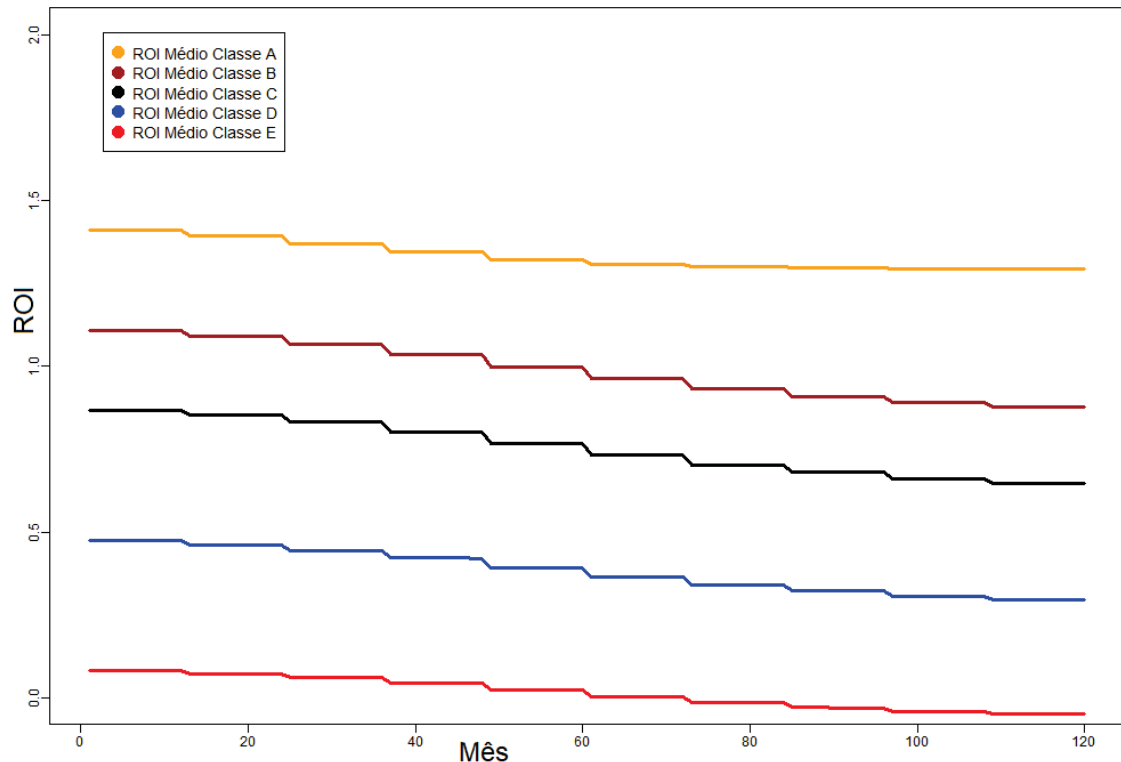
Figura 4.3: Porcentagem de Adotantes por Classe Social da Simulação Base



Fonte: Elaboração Própria.

Já na Figura 4.3 é apresentado como a distribuição de renda das famílias tem um impacto importante na difusão dos sistemas. A classe social A é responsável por quase toda a adoção seguida pela classe social B. As outras 3 classes não contribuem expressivamente na difusão. O que faz bastante sentido, se for considerado que esses sistemas são relativamente caros. Dessa forma, quando existe um alto grau de concentração de renda, torna-se mais difícil a difusão por classes com menor poder aquisitivo.

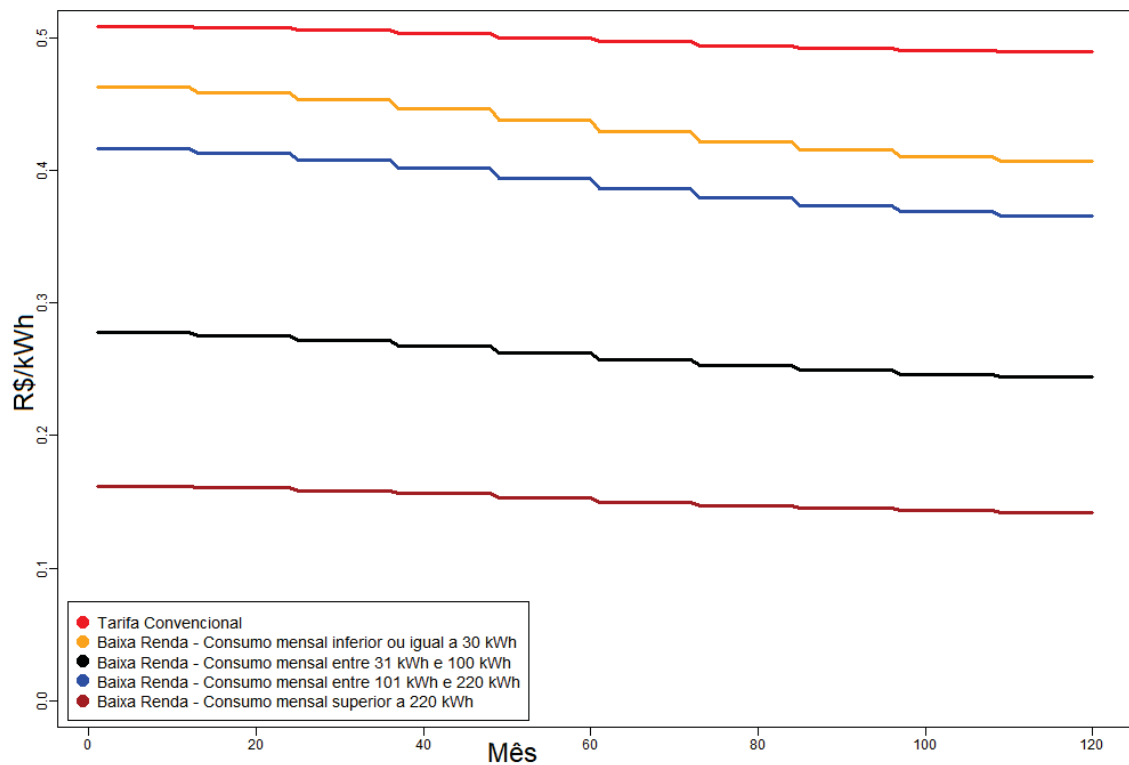
Figura 4.4: ROI médio por Classe Social da Simulação Base



Fonte: Elaboração Própria.

Existem alguns fatores que podem ser críticos para que os sistemas fotovoltaicos não tenham se difundido entre as classes C, D e E. Um deles é a concentração de renda como já foi citado anteriormente. Como existe um fator na tomada de decisão das famílias, relacionado a suas rendas, quanto menor a renda da família, menor será a probabilidade dela investir nos sistemas fotovoltaicos. Como o modelo apresenta uma quantidade muito grande de famílias com rendas menores do que as classes mais ricas, torna-se mais difícil a adoção do sistema se pelas classes mais baixas. Outro fator que influencia o menor investimento das classes com menor renda na geração solar é a baixa rentabilidade para estas classes. Como pode ser observado na Figura 4.4, há uma diferença entre o ROI obtido por cada uma das classes sociais. Existem dois fatores principais que levam a essa diferença, o primeiro é o expressivo custo fixo na instalação dos sistemas, famílias que instalam sistemas maiores tem um custo por kWp instalado em média menor. O segundo fator é o modelo considera diferentes preços de energia entre as famílias, com os preços mais baratos das tarifas, há um desestímulo pelas classes mais baixas a consumirem os sistemas fotovoltaicos.

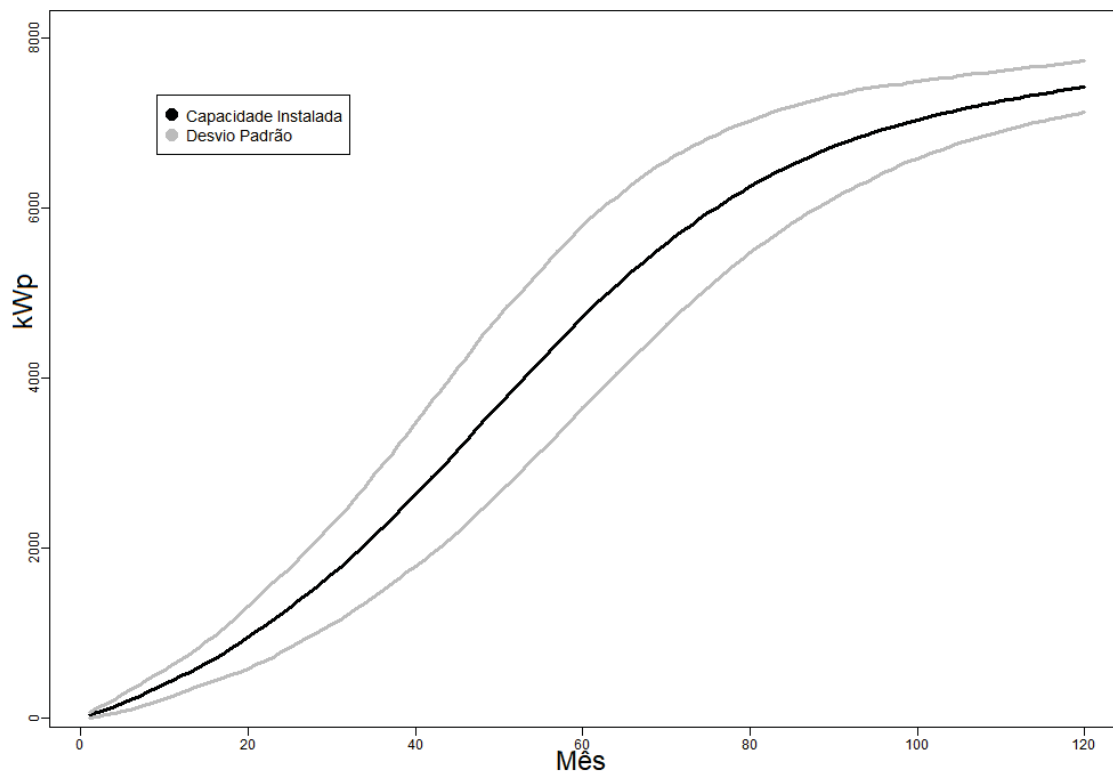
Figura 4.5: Evolução dos preços da Tarifa de Energia da Simulação Base



Fonte: Elaboração Própria.

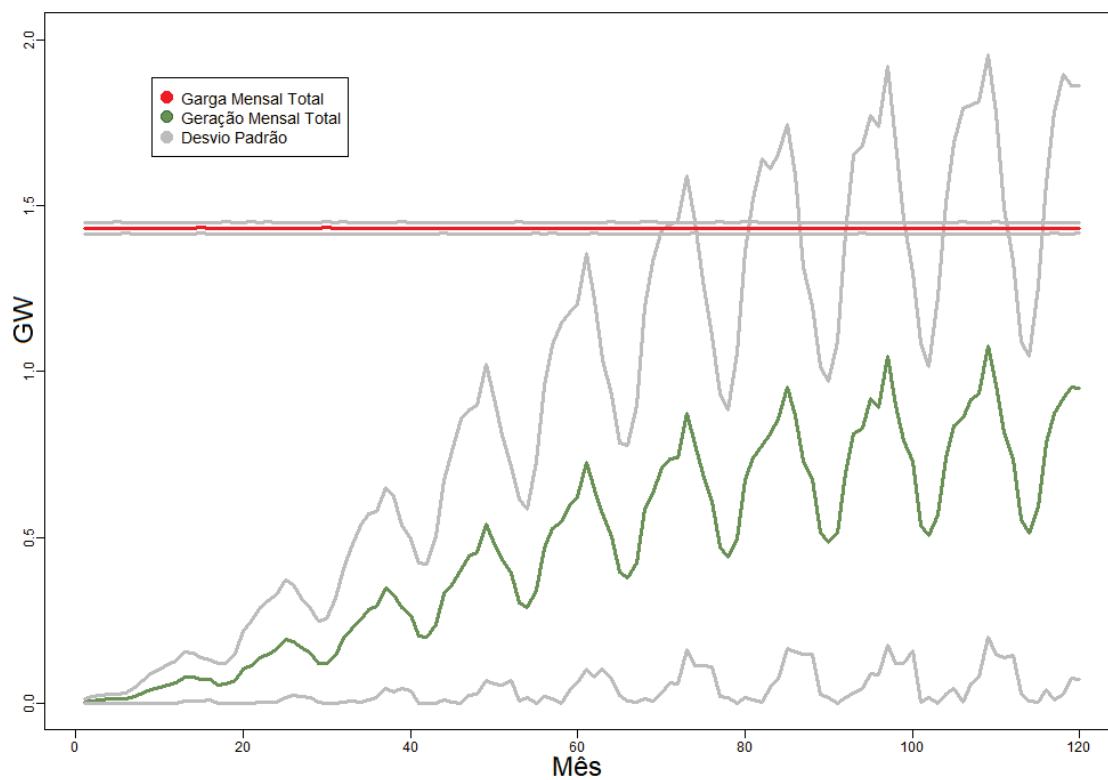
A Figura 4.5 apresenta a evolução dos preços das tarifas de energia elétricas. Ao longo da difusão da tecnologia os preços apresentam uma queda que também se reflete numa redução do ROI das famílias como pode ser visto na Figura 4.4. Isso ocorre uma vez que retorno das famílias depende do quanto elas economizam com as contas de energia elétrica. Se ao longo do processo de difusão o preço da tarifa cai, investir nos sistemas se torna cada vez menos atrativo.

Figura 4.6: Evolução da Capacidade Instalada Total da Simulação Base



Fonte: Elaboração Própria.

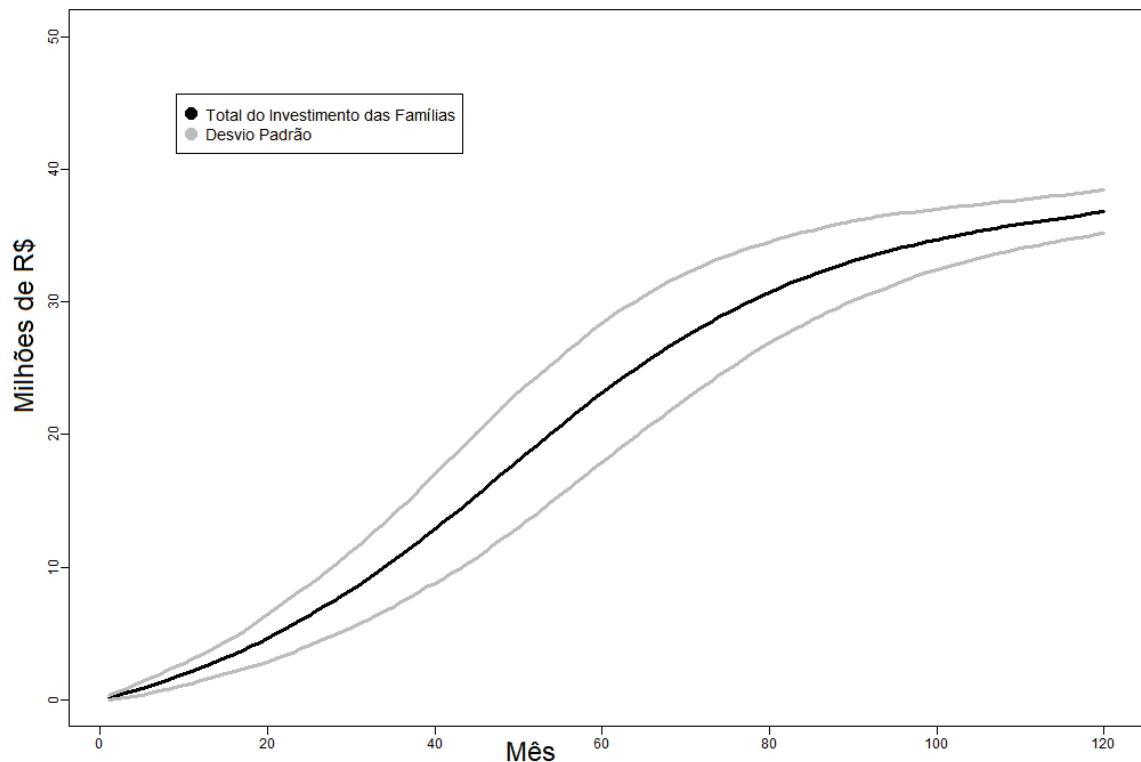
Figura 4.7: Evolução da Carga e Geração Distribuída da Simulação Base



Fonte: Elaboração Própria.

Figura 4.6 mostra a evolução da capacidade instalada medida em kWp, a curva da evolução da capacidade instalada após 10 anos estaciona por volta de 7.360 kWp, e gerando em média no final da simulação 0,922 GW/mês como pode ser visto na Figura 4.7. Em algumas simulações a geração distribuída pode ser até maior que o consumo das residências, como pode ser analisado pelos desvios padrões na Figura 4.7. Dessa forma, o setor residencial se torne em alguns casos um fornecedor de energia para o sistema elétrico. Outro fato a ser analisado na Figura 4.7 é a periodicidade anual da geração, como existe diferenças de temperatura e irradiação solar ao longo do ano cria-se um efeito sazonal na geração distribuída.

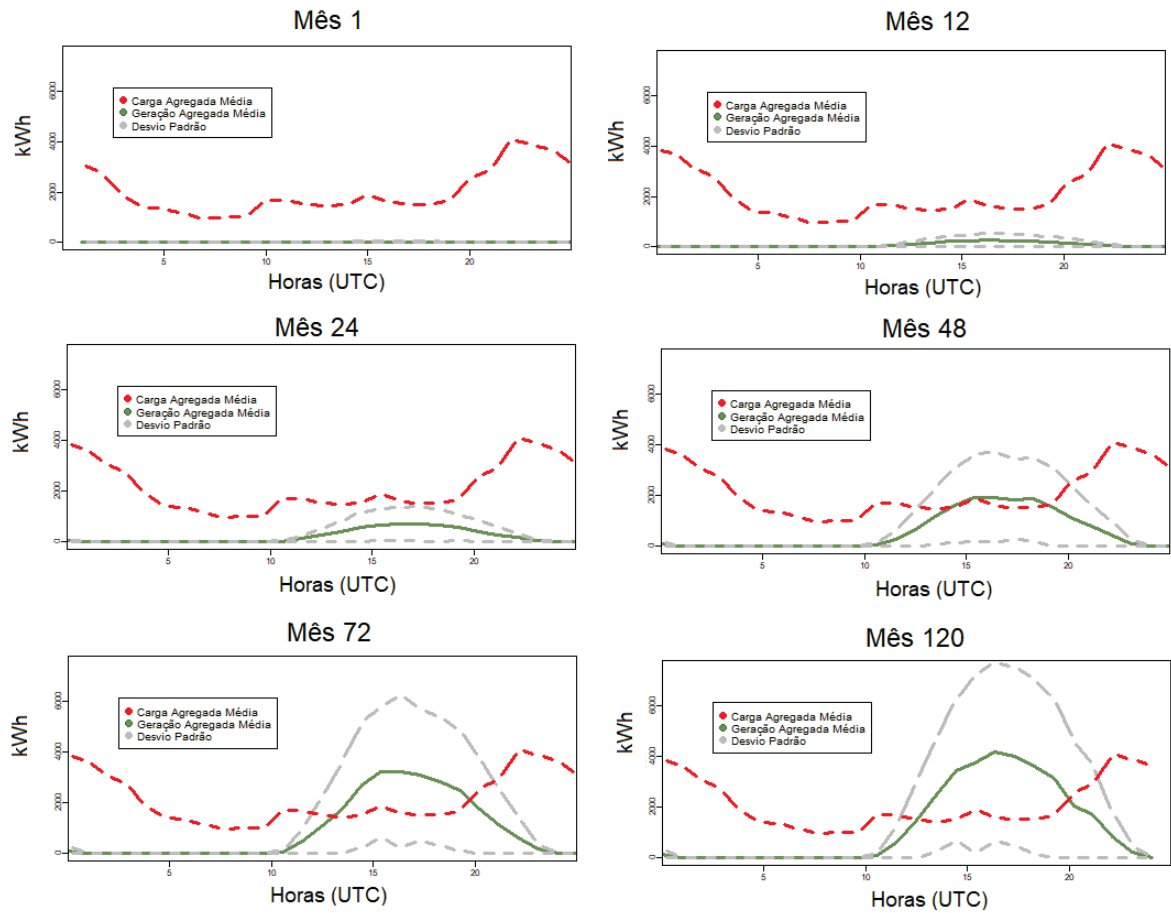
Figura 4.8: Evolução do Investimento das Famílias da Simulação Base



Fonte: Elaboração Própria.

O investimento das famílias ao final de 10 anos fica próximo aos 36,5 milhões de reais. Pode não parecer um investimento tão alto, mas a cidade estilizada representa um município com 3.840 famílias ou cerca de 15 mil habitantes. Para esse padrão de cidade, um investimento espontâneo das famílias dessa magnitude, é expressivo e como foi visto anteriormente, em alguns casos podam transformar o setor residencial num fornecedor de energia elétrica para o restante do sistema.

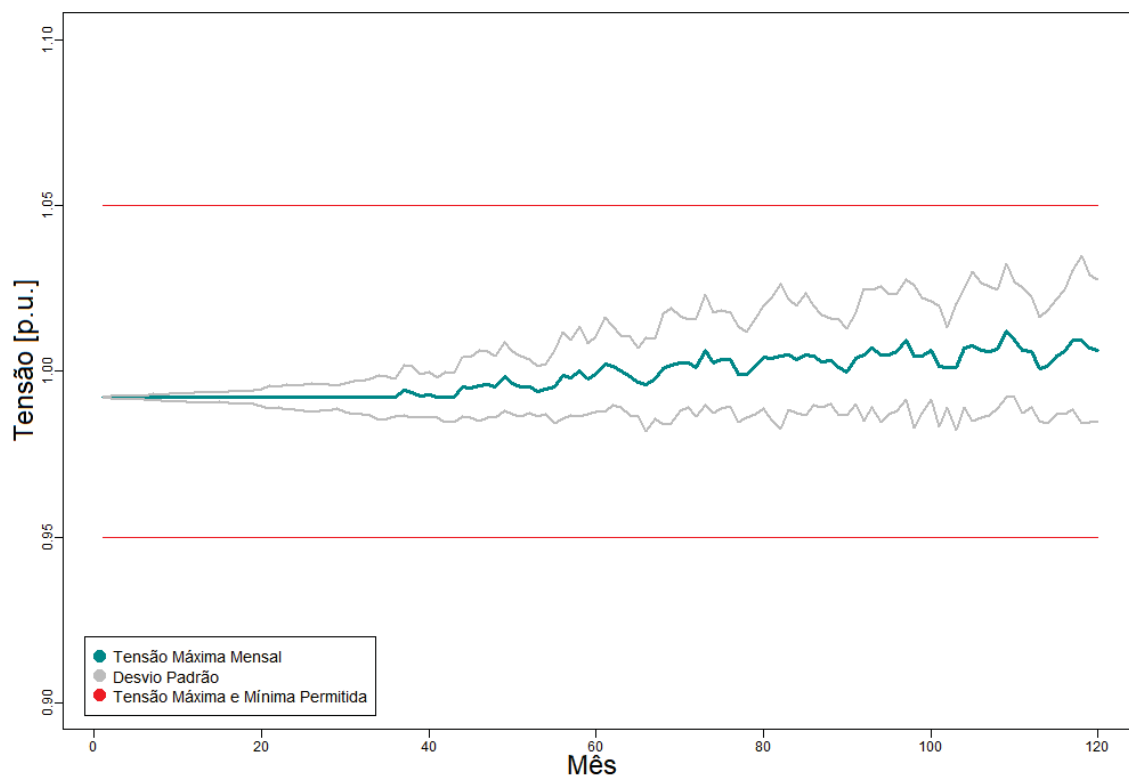
Figura 4.9: Evolução da Geração Distribuída e Carga dos Dias Representativos



Fonte: Elaboração Própria.

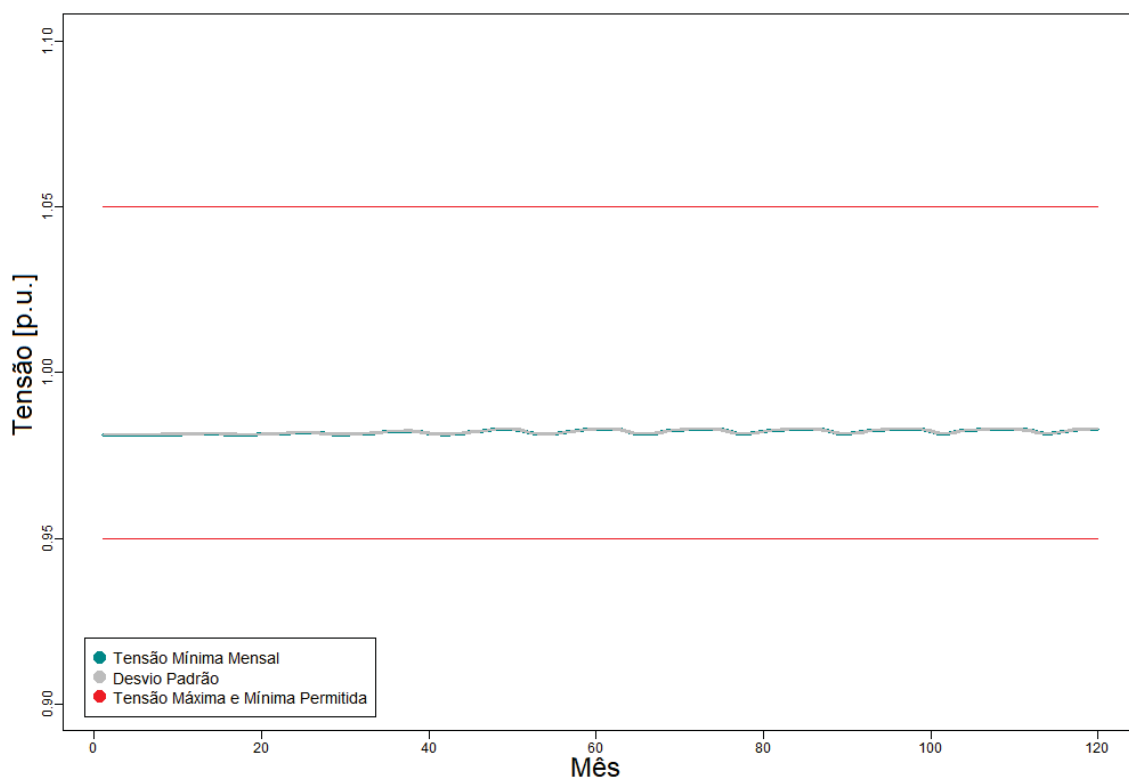
A Figura 4.9 apresenta a evolução de alguns dias representativos ao longo dos 120 meses. É importante destacar que a energia gerada pelas famílias não coincide com o pico e carga que acontece 21h e 24h UTC, esse fenômeno caso a rede não esteja adequadamente preparada pode criar uma sobrecarga no sistema.

Figura 4.10: Tensão Máxima Mensal do Sistema



Fonte: Elaboração Própria.

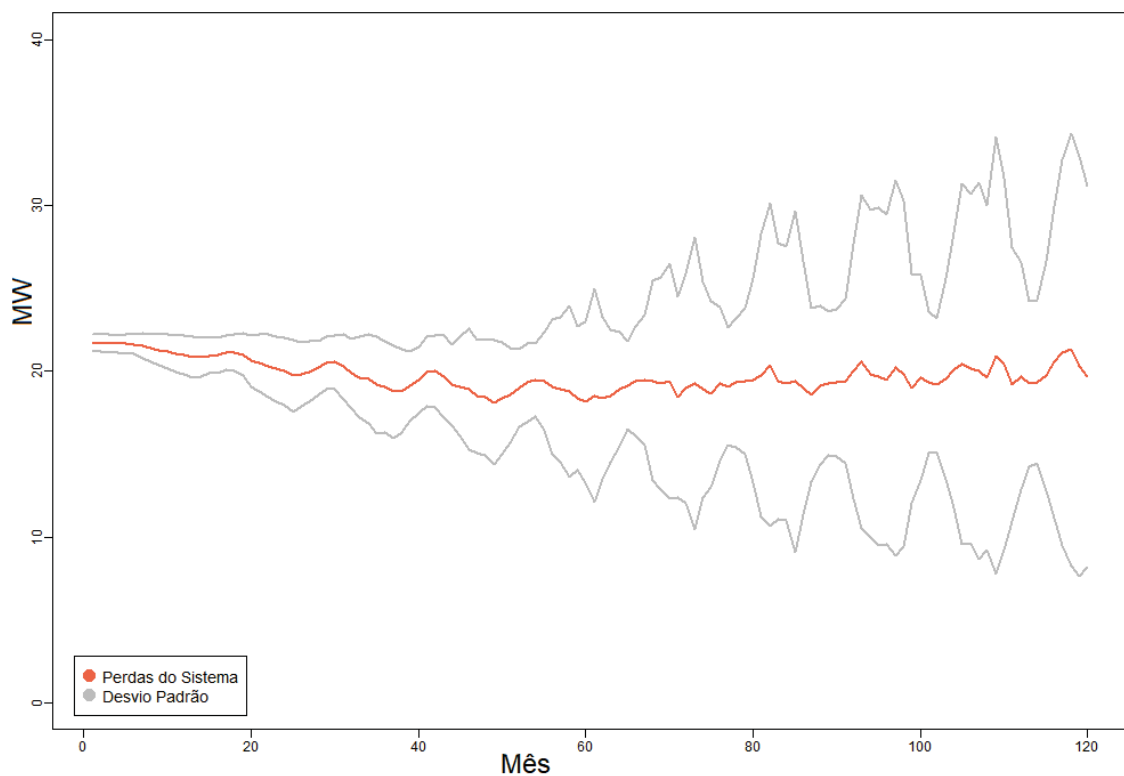
Figura 4.11: Tensão Mínima Mensal do Sistema



Fonte: Elaboração Própria.

Nas Figuras 4.10 e 4.11, são apresentados as tensões máximas e mínimas do sistema elétrico que são medidas em p.u (por unidade), além dos limites máximos e mínimos permitidos pela ANEEL. Na configuração proposta do modelo, não foram ultrapassados os limites estabelecidos pelas ANEEL, tanto a tensão máxima quanto a mínima, mas é importante ressaltar que os bairros de classe social A e B estão próximos à barra de referência. Como nesses bairros a densidade da geração distribuída é maior, o impacto na tensão máxima e mínima do sistema são menores que numa configuração em que esses bairros estivessem mais distantes da barra de referência. Outra configuração também foi testada com será visto mais a frente, nessa, os bairros com maior adensamento de geração distribuída estão situados nos pontos mais radiais do sistema elétrico, dessa forma é possível analisar os dois extremos dessas configurações. Mesmo com essa ressalva pode-se perceber um aumento da tensão máxima do sistema ao longo dos anos, o que deve ser considerado no planejamento da infraestrutura energética de uma cidade. O modelo não apresenta crescimento da população, mas numa cidade com adensamento populacional e expansão dos limites urbanos esse pode ser um fator a ser considerado no planejamento e expansão da rede elétrica.

Figura 4.12: Evolução das Perdas do Sistema



Fonte: Elaboração Própria.

Já sobre as perdas elétricas do sistema espera-se que com a implementação da geração distribuída elas reduzam, uma vez que a distância percorrida pela energia seria menor, mas a Figura 4.12, mostra que isso não ocorre no modelo. Como foi discutido anteriormente sobre as tensões, as regiões com maior inserção de geração distribuída estão próximas a barrar de referências e isso pode acarretar um impacto menor nas perdas do sistema com as configurações da simulação.

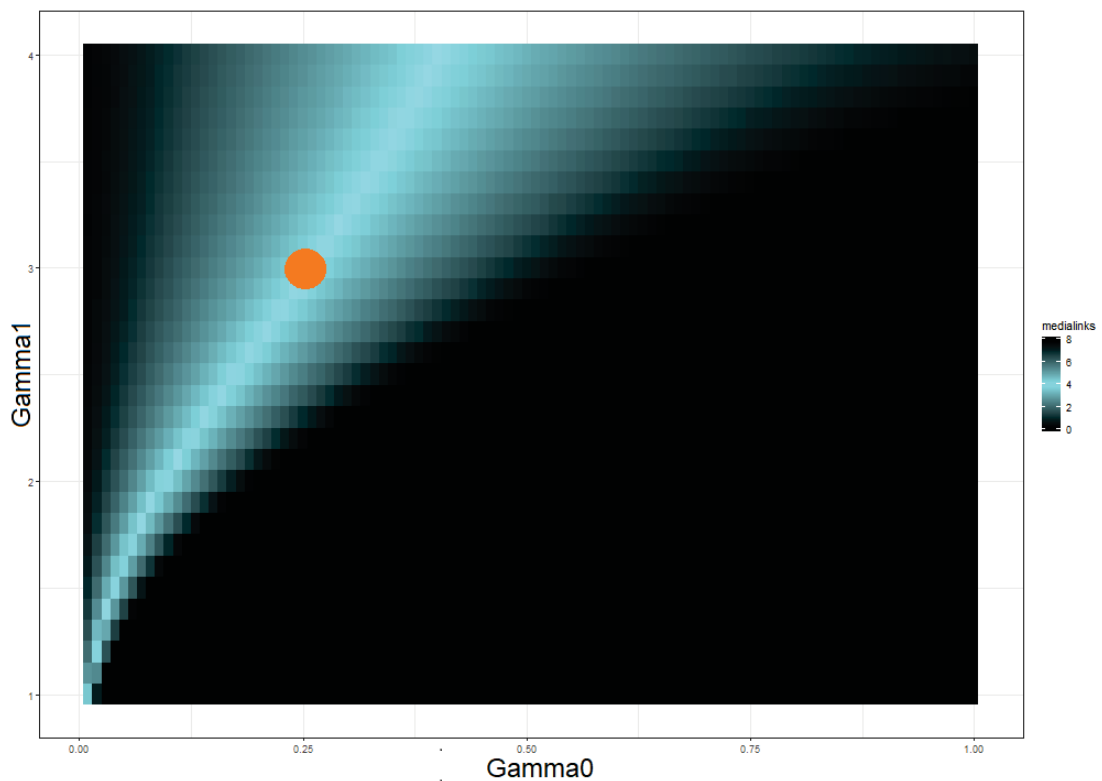
4.2 SIMULAÇÕES DE SENSIBILIDADE DO MODELO

Para avaliar como se comportam os resultados em diferentes configurações foram realizadas análises de sensibilidade baseada na quantidade média dos laços sociais, no perfil das famílias, no preço em relação ao número de adotantes dos sistemas fotovoltaicos e na reconfiguração da rede elétrica.

4.2.1 Resposta do Modelo ao Número de Laços Sociais

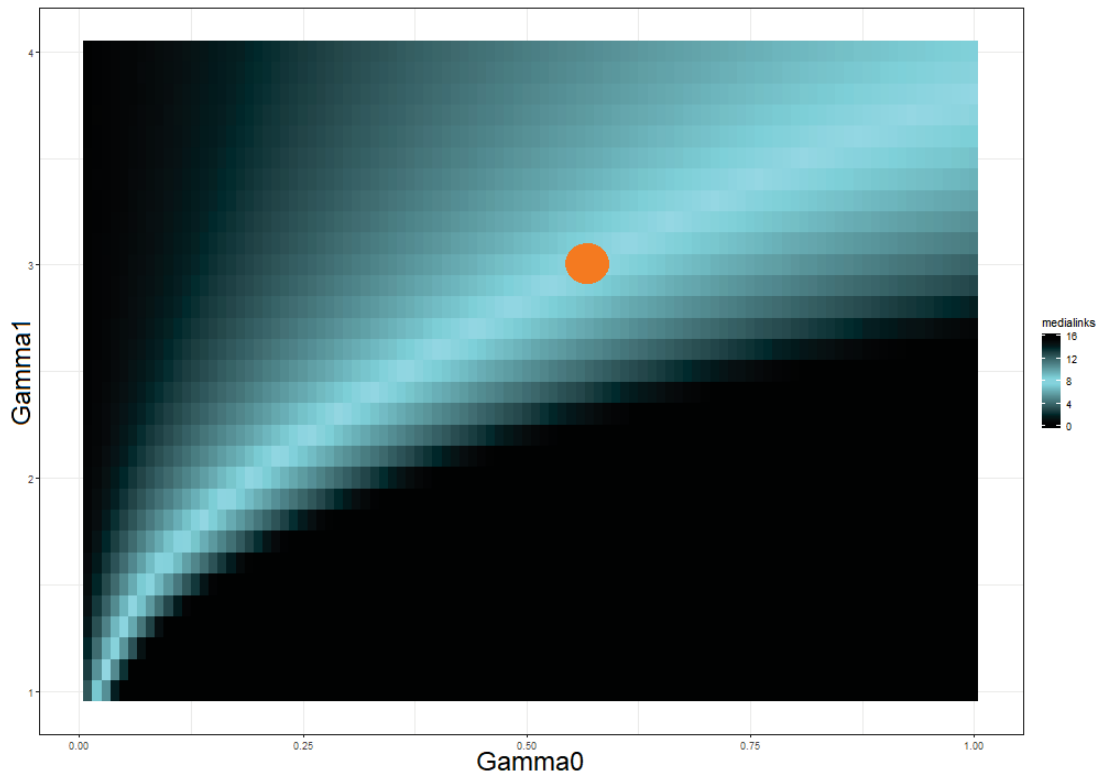
Inicialmente variou-se os parâmetros γ_1 e γ_2 para obter a combinação dos dois parâmetros que criariam em média 4, 6 e 8 laços por família como pode ser observado na Figura 4.13, 4.1 e 4.14.

Figura 4.13: Variação dos Parâmetros γ_1 e γ_2 que geram 4 Laços Sociais



Fonte: Elaboração Própria.

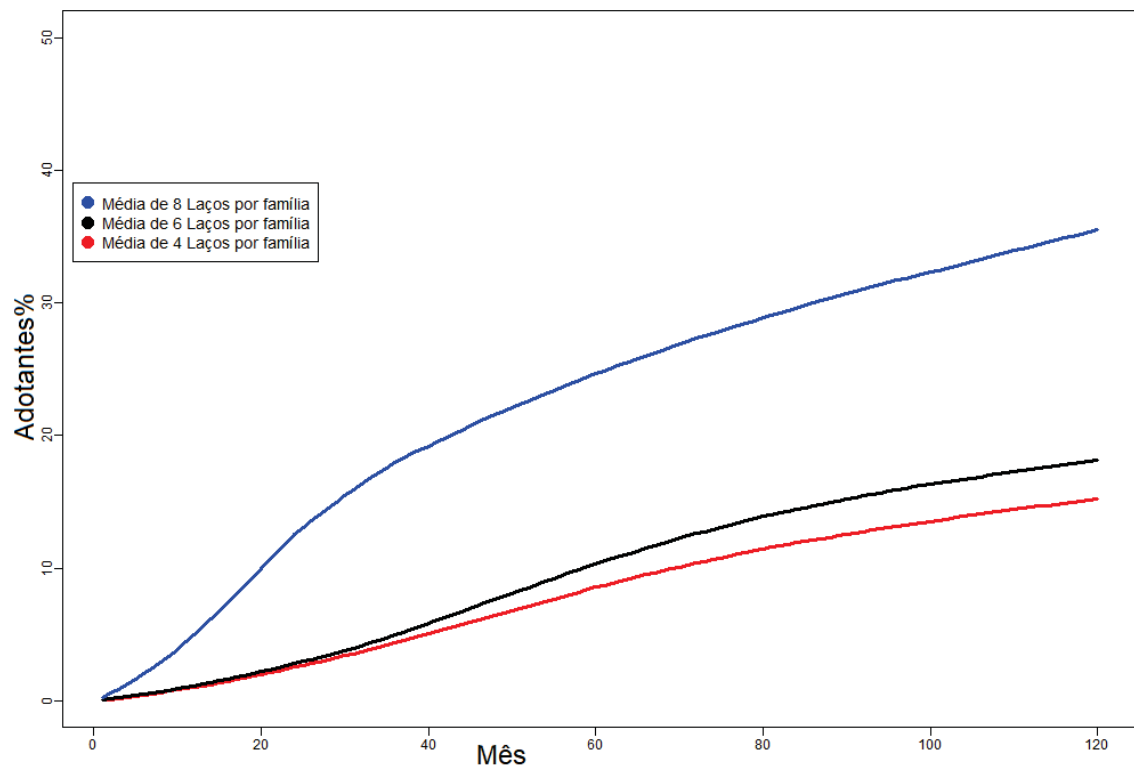
Figura 4.14: Variação dos Parâmetros γ_1 e γ_2 que geram 8 Laços Sociais



Fonte: Elaboração Própria.

Para a simulação base γ_1 e γ_2 escolhidos foram 0.40 e 3 respectivamente, como pode ser visto na figura 4.1. Para criar a simulação com 4 laços γ_1 e γ_2 foram 0.25 e 3 representado o como pode ser visto na figura 4.13, por fim, simulação com 8 laços γ_1 assume o valor de 0.57 e γ_2 3 como é apresentado na Figura 4.14.

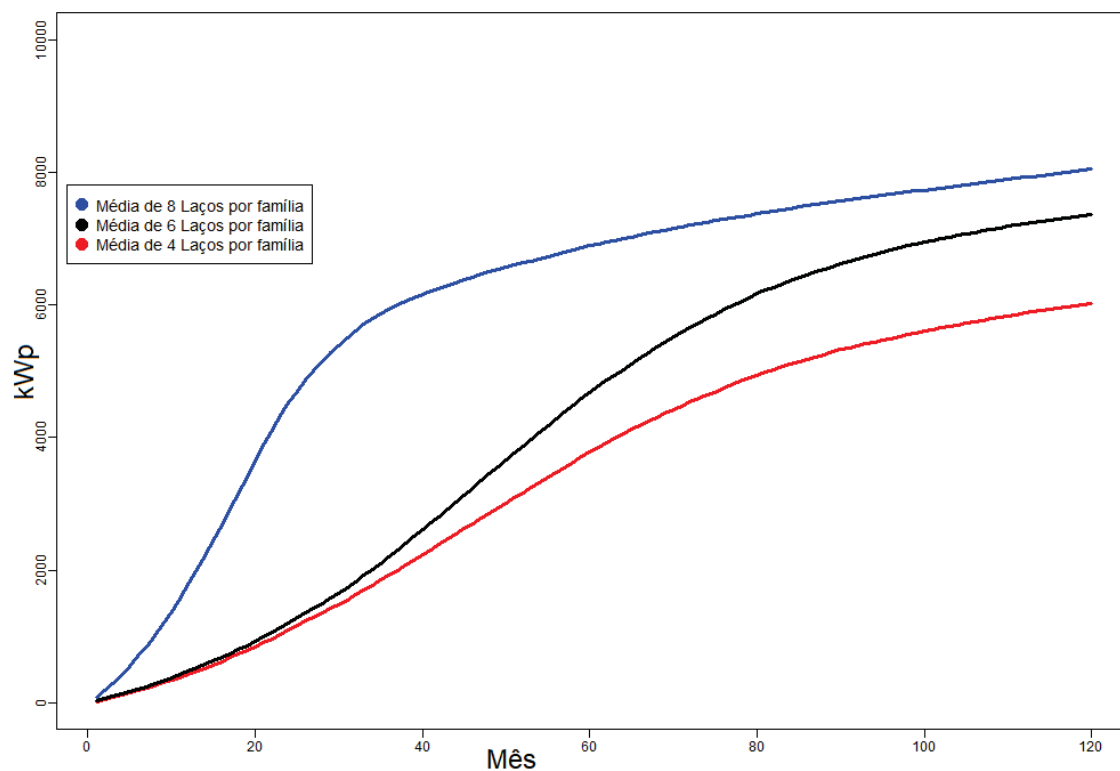
Figura 4.15: Percentual de Adotantes das Simulações com Diferentes Quantidades de Laços Sociais



Fonte: Elaboração Própria.

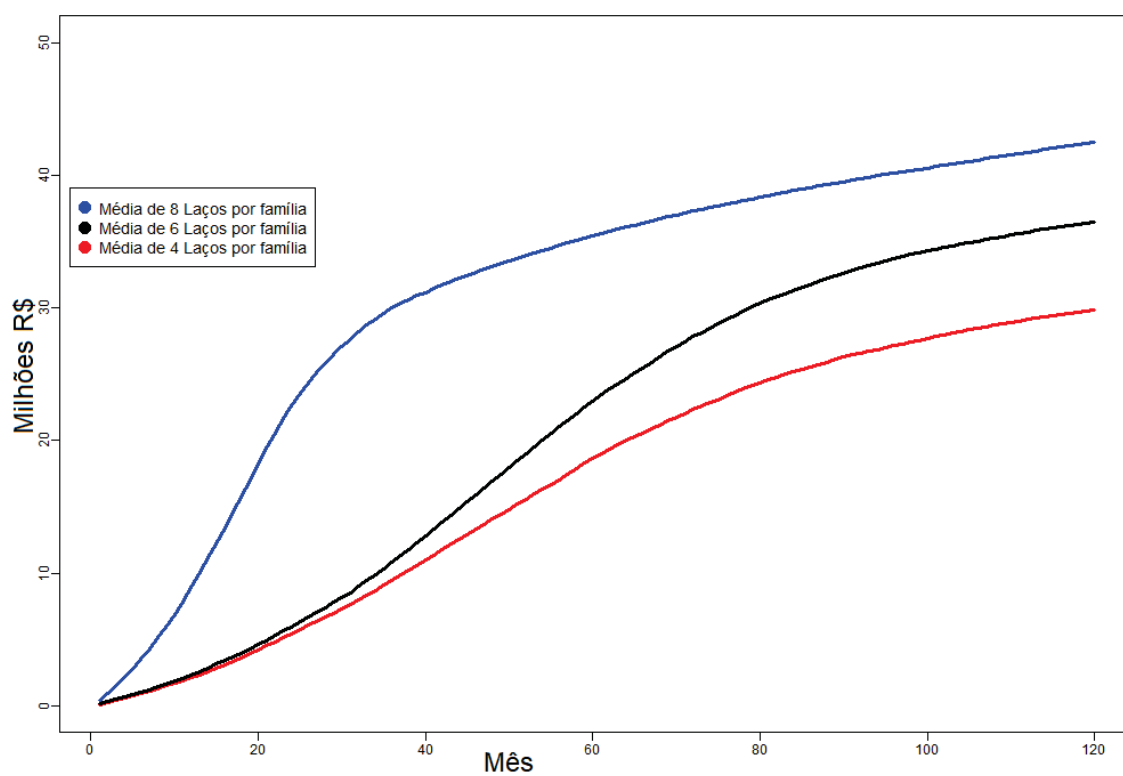
Na Figura 4.15 é apresentada a diferença da evolução dos adotantes do sistema ao longo do tempo para os 3 diferentes casos. Quando aumenta o número de laços médio por família a taxa inicial de adotantes é maior ao longo do modelo o crescimento continua maior do que as outras duas simulações, ao fim dos 10 anos essa simulação termina com 36,15% das famílias tendo aderido à geração distribuída. Isso ocorrer porque quanto mais famílias adotam o sistema na cidade mais fácil é de uma nova também adotar, uma vez cada vez mais pessoas do seu círculo social a influenciam a adotar. Agora em relação à simulação com média de 4 laços sociais ela apresenta uma taxa de adoção menor do que a simulação base cerca de 15,22% ao final do processo de difusão, mas segue a mesma tendência de evolução.

Figura 4.16: Capacidade Instalada nas Simulações com Diferentes Quantidades de Laços Sociais



Fonte: Elaboração Própria.

Figura 4.17: Total do Investimento das Famílias nas Simulações com Diferentes Quantidades de Laços Sociais



Fonte: Elaboração Própria.

Já nas Figuras 4.16 e 4.17 os padrões de mantêm-se tanto na capacidade instalada e quanto no investimento das famílias em relação ao padrão dos adotantes. Mesmo com a simulação com média de 8 laços sociais apresentando um número expressivamente maior de adotantes, quando se trata de capacidade instalada e investimento das famílias a diferença entre as simulações se torna proporcionalmente menor. Isso acontece devido ao investimento maior que é feito pelas famílias com maior consumo de energia elétrica. Na simulação com média de 8 laços as famílias da classe C começam a adotar os sistemas fotovoltaicos, mas como o consumo de energia dessas famílias é menor os sistemas acabam sendo menores, que impacta em um crescimento mais lento da capacidade instalada e do investimento total.

4.2.2 Resposta do Modelo a outros Perfis de Adoção de Tecnologia

Outros fatores analisados são os diferentes perfis de adotantes do modelo. Na simulação base adotou-se a distribuição de perfis apresentada por Rogers, mas existem sociedades com diferentes perfis a respeito do consumo de inovações tecnológicas, fatores não analisados nesse trabalho como escolaridade, idade, empregos, entre outros podem influenciar nos perfis das famílias. Por isso foram analisados diferentes distribuições de perfis das mesmas para buscar entender quais seriam os impactos na difusão.

Tabela 4.3: Diferentes Perfis de Adoção da Sociedade

Perfil das Sociedade	I^[1]	AI^[2]	MI^[3]	MT^[4]	R^[5]
Rogers	2,5%	13,5%	34%	34%	16%
Inovadora	25%	30%	25%	15%	5%
Neutra	10%	25%	30%	25%	10%
Conservadora	5%	15%	25%	30%	25%
Igualitária	20%	20%	20%	20%	20%

Fonte: Elaboração Própria.

(1) Inovadores

(2) Adotantes Iniciais

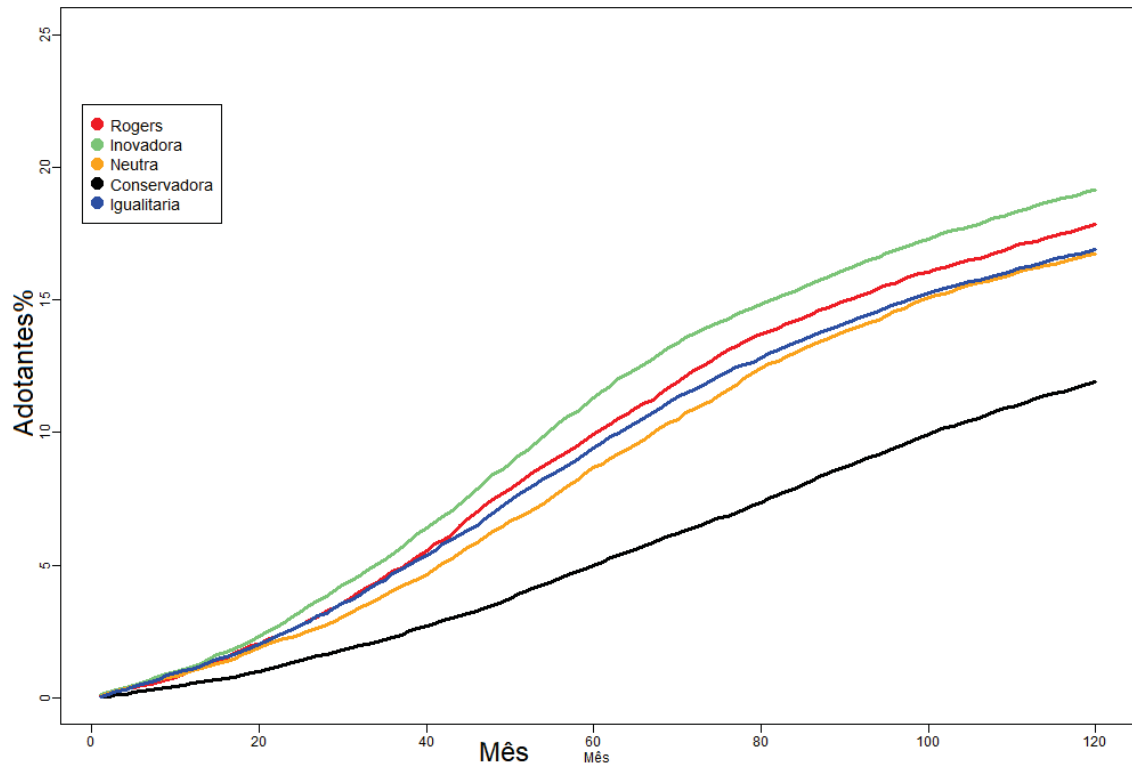
(3) Maioria Inicial

(4) Maioria Tardia

(5) Retardatários

A Tabela 4.3 apresenta as diferentes distribuições de perfis de adoção de inovação em relação a 5 diferentes perfis de sociedade.

Figura 4.18: Percentual de Adotantes para Diferentes Perfis de Adoção de Inovação

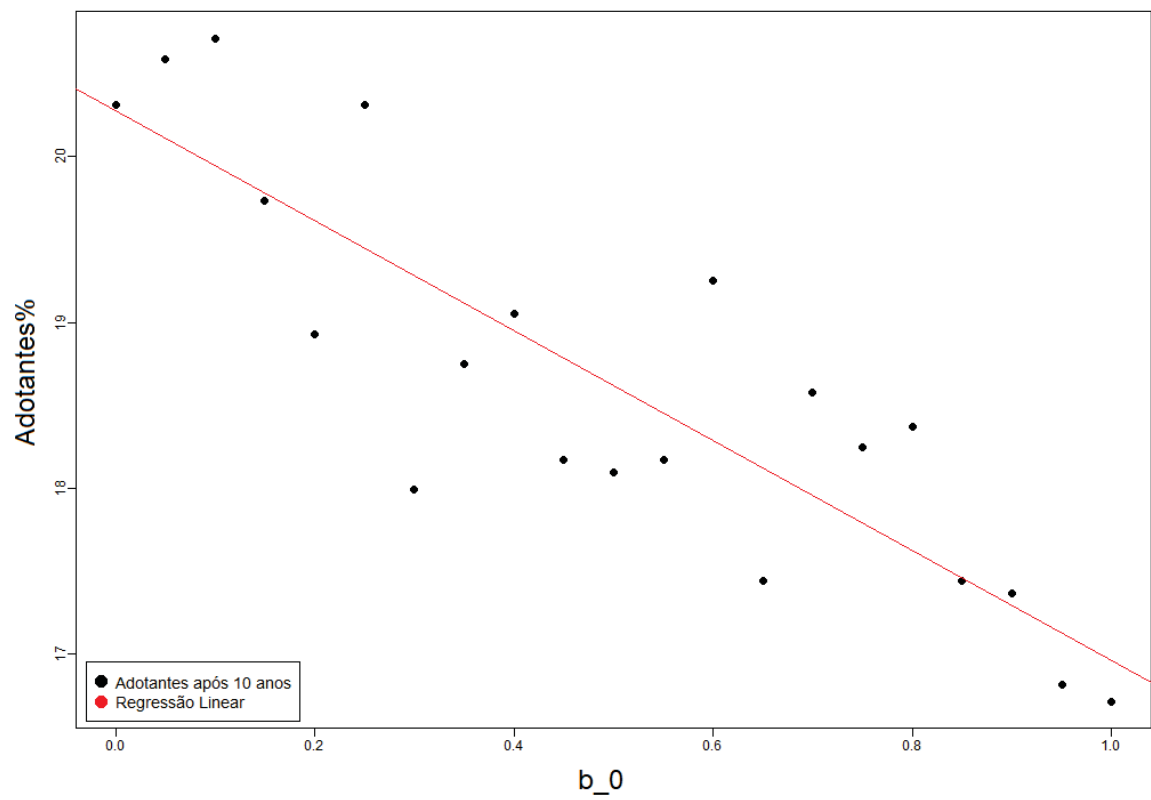


Fonte: Elaboração Própria.

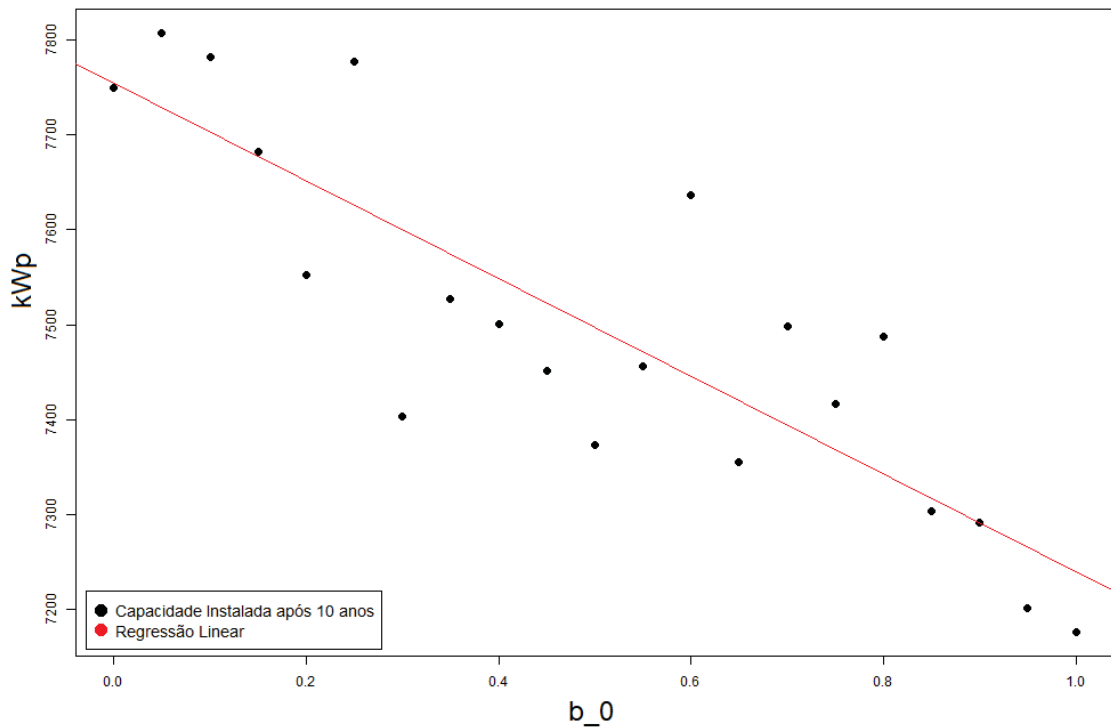
O perfil de sociedade apresentado por Rogers encontra-se entre os perfis propostos no modelo como Inovadora e Neutra. Quase todos os perfis apresentam resultados muito próximos, menos a sociedade com um perfil conservador, que apresenta uma taxa de adoção relativamente menor do que os demais. Quanto mais inovadora é a sociedade, maior e mais rápido será o processo de adoção dos sistemas na cidade.

4.2.3 Resposta do Modelo a Diferentes β_0

No modelo criou-se um mecanismo de resposta do preço a quantidade de adotantes dos sistemas fotovoltaicos. Analisou-se os diferentes β_0 parâmetro de sensibilidade dos preços a quantidade de adotantes para avaliar seu impacto dentro do modelo.

Figura 4.19: O Impacto de β_0 na Quantidade Final de Adotantes

Fonte: Elaboração Própria.

Figura 4.20: O Impacto de β_0 na Capacidade Total Instalada

Fonte: Elaboração Própria.

Como é apresentado nas Figuras 4.21 e 4.22, existem uma relação inversa tanto da quantidade de adotante, quanto da capacidade instalada sobre o β_0 . Esse efeito era esperado uma vez que o β_0 impacta na queda dos preços que afeta diretamente o ROI das famílias. O interessante dessa análise é perceber que mesmo o β_0 virando com a amplitude de 0 a 1, o impacto no total de adotantes não chega a 3,5%, ou seja, o mecanismo de resposta dos preços a quantidade de adotantes tem influência no modelo, mas a magnitude não é alta.

4.2.4 Resposta do Modelo a outra configuração da rede elétrica

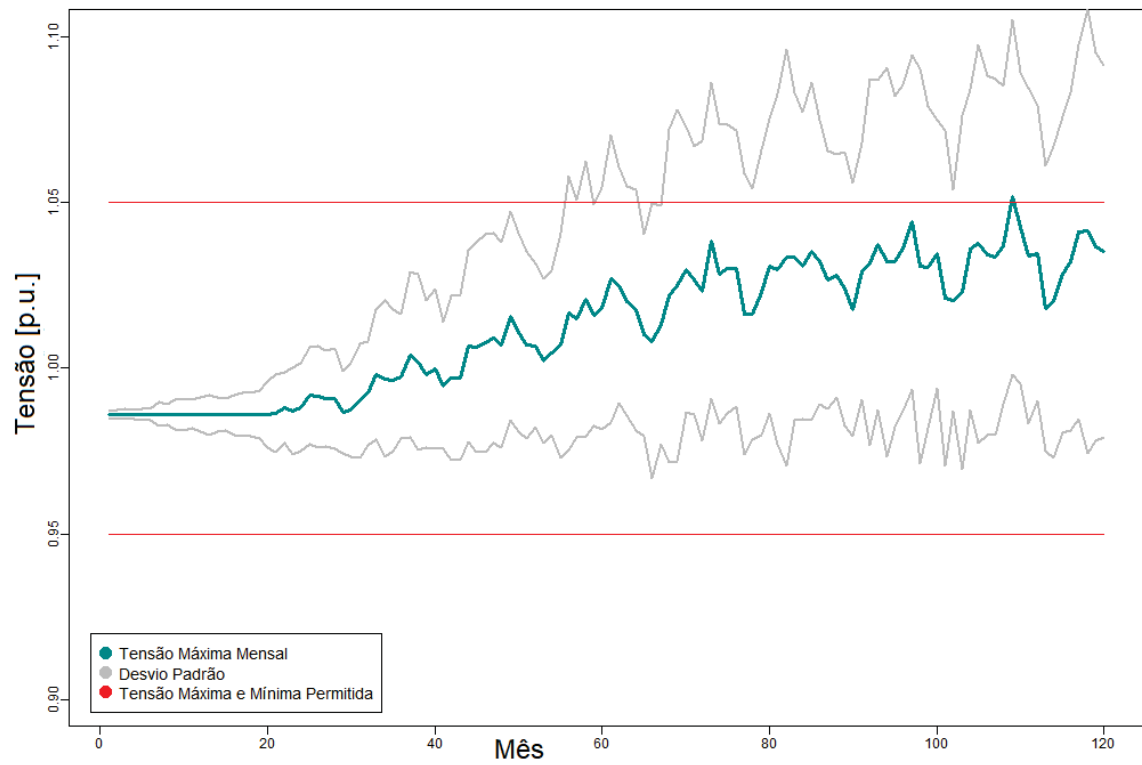
Como última análise de sensibilidade do modelo, reconfigurou-se os bairros que apresentam maior percentual de adoção dos sistemas fotovoltaicos os colocando nos ramos mais radiais da rede elétrica. Como pode ser observado na Tabela 4.4:

Tabela 4.4: Distribuição de Renda e Ligação na Rede Elétrica de cada Região do Modelo

Regiões	Classe Social	Barras
01/02/03/04	A	18/22/33/25
05/06/07/08	B	17/21/32/24
09/10/11/12	C	10/11/12/13
13/14/15/16	C	14/15/16/06
17/18/19/20	C	02/19/20/07
21/22/23/24	C	03/23/09/05
25/26/27/28	D	26/27/28/29
29/20/31/32	E	30/31/08/04

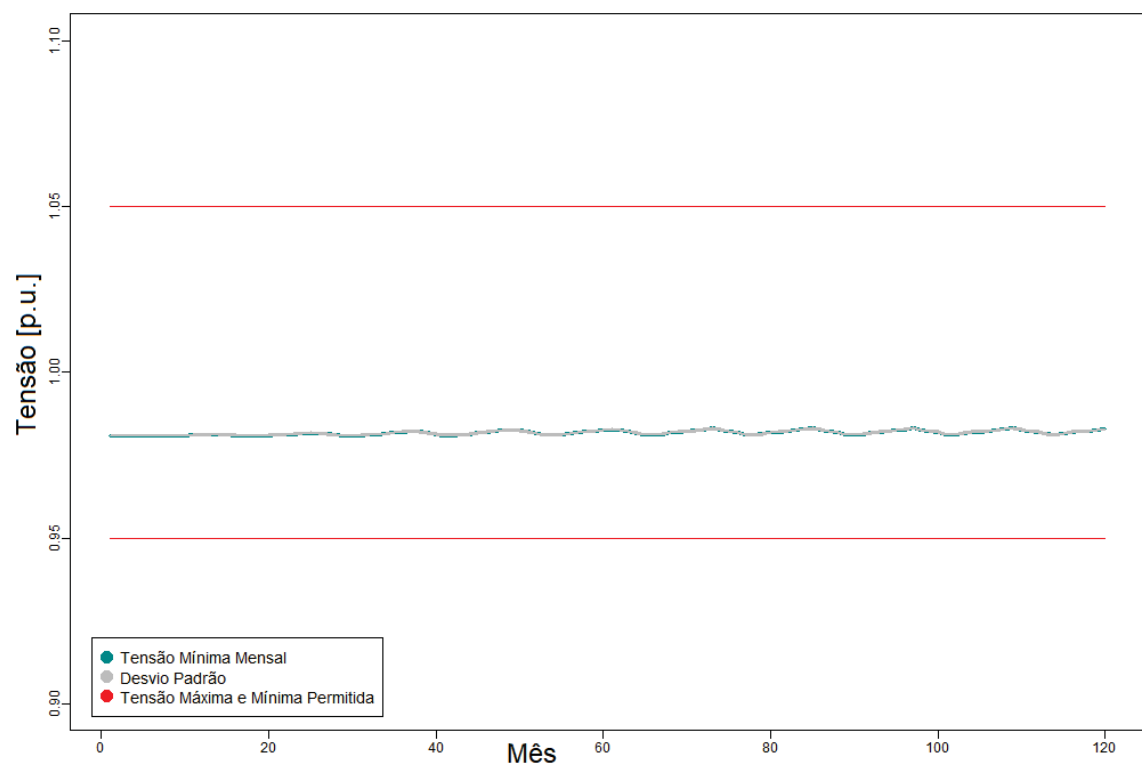
Fonte: Elaboração Própria.

Figura 4.21: Tensão Máxima do Sistema Reconfigurado



Fonte: Elaboração Própria.

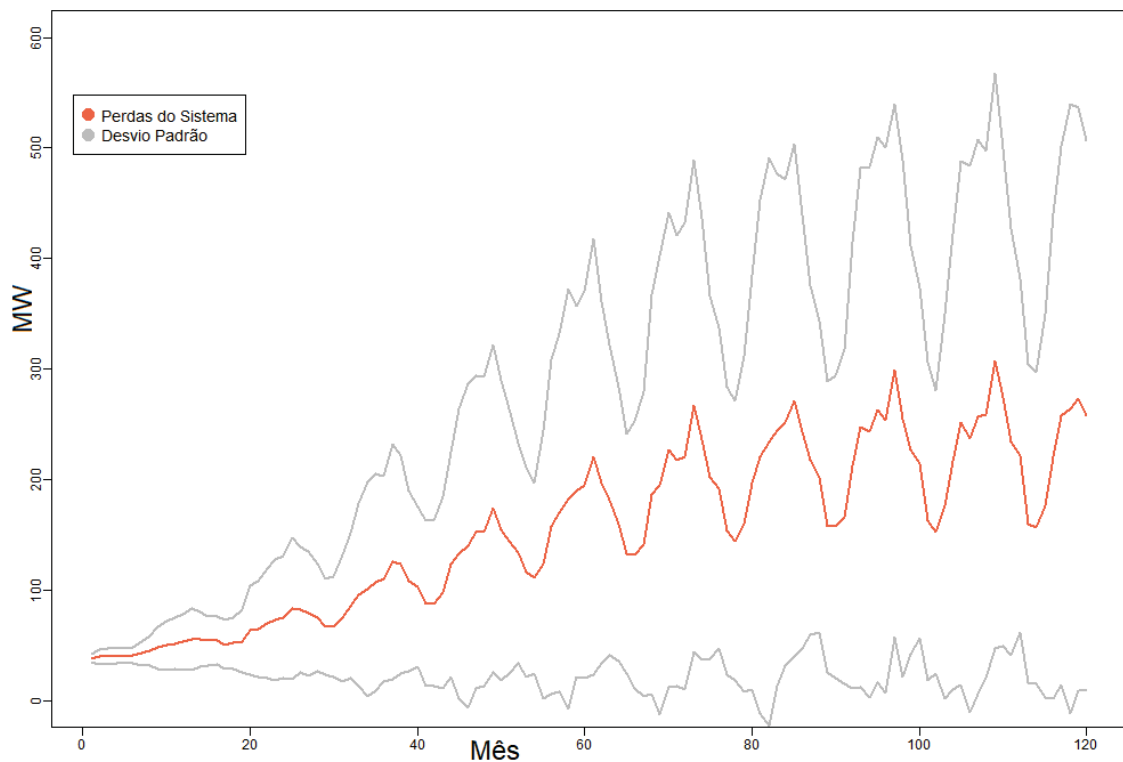
Figura 4.22: Tensão Mínima do Sistema Reconfigurado



Fonte: Elaboração Própria.

Com essa nova configuração da rede elétrica a tensão máxima passa os limites estabelecidos pela ANEEL, mostrando que dependendo da configuração da rede elétrica da cidade simulada pode necessitar de investimentos em infraestrutura para garantir a estabilidade do sistema ou limitar a geração distribuída nessas regiões à potência máxima permitida.

Figura 4.23: Perdas do Sistema Reconfigurado



Fonte: Elaboração Própria.

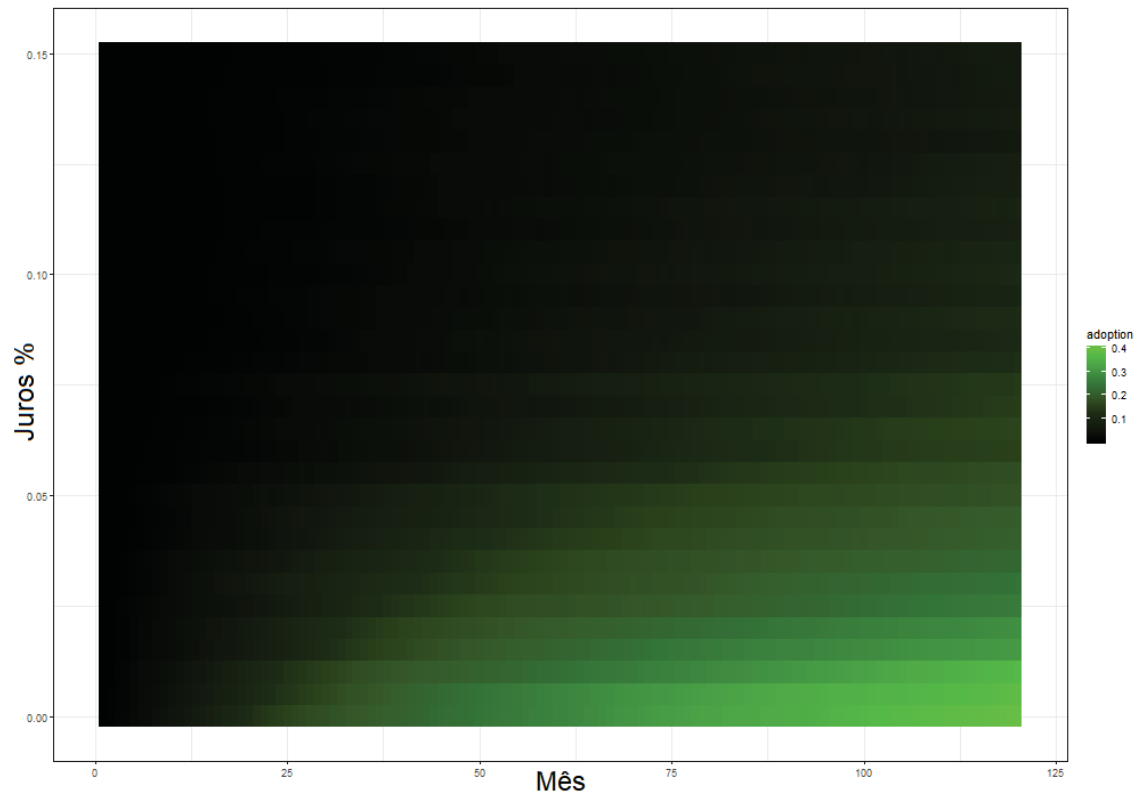
Na nova configuração da rede elétrica as perdas aumentam ao longo do sistema, o que é contra intuitivo, uma vez que o esperado é que com a instalação de geração distribuída a energia percorra menores distâncias até o seu destino, reduzindo assim as perdas. Provavelmente que tenha acontecido nesse caso, é que como a geração fotovoltaica ocorre em horários diferentes dos picos de carga no sistema e os bairros com maior produção de energia solar, agora se encontram longe de barra de referência, a energia no horário de pico da geração tem que percorrer grande parte do sistema elétrico para ser escoada para a barra de referência para não sobrecarregar o sistema. Dessa forma, esse é um resultado interessante, pois dependendo do padrão de consumo e da disposição da rede a implementação dos sistemas fotovoltaicos pode aumentar ou reduzir as perdas.

4.3 APLICAÇÃO DE POLÍTICAS PÚBLICAS

A partir dos resultados da simulação base e da avaliação da sensibilidade do modelo, são simuladas diferentes cenários de políticas para avaliar seu efeito sobre as taxas de difusão dos sistemas fotovoltaicos. O efeito de variações na taxa de juros, ICMS, subsídios no preço do sistema, fixar o valor da compra da energia renovável gerada pelas residências e diferentes tarifas elétricas.

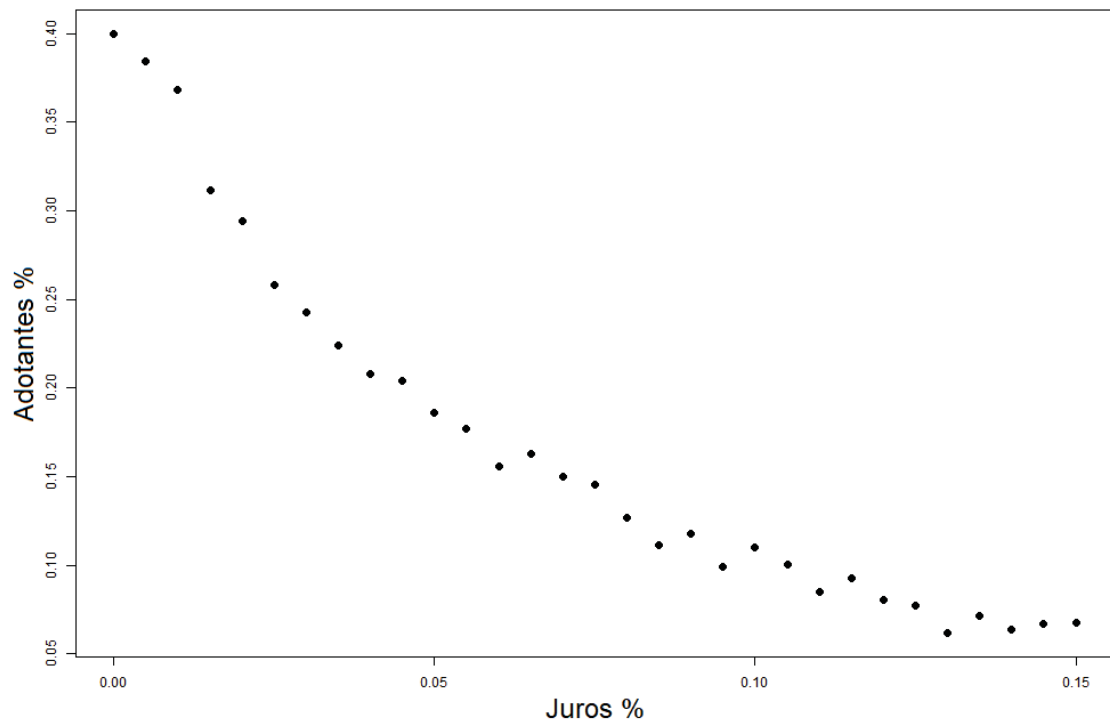
4.3.1 Taxa de Juros

Figura 4.24: Evolução do Percentual de Adotantes para Diferentes Taxas de Juros



Fonte: Elaboração Própria.

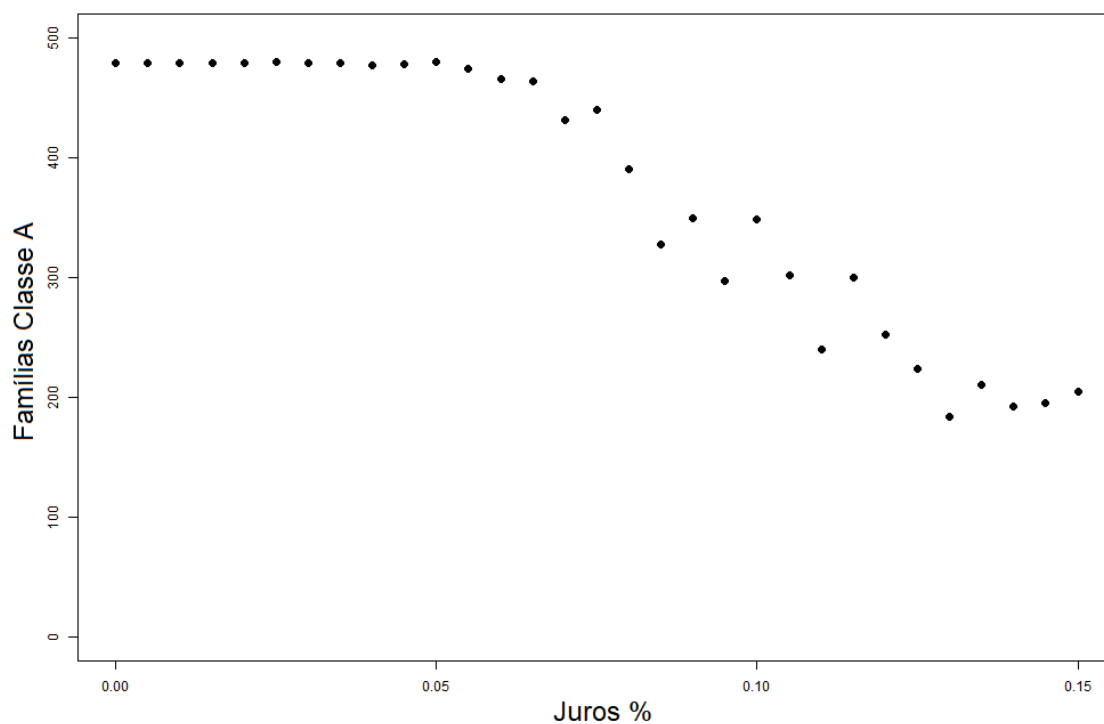
Figura 4.25: Resultado Final dos Adotantes para Diferentes taxas de Juros



Fonte: Elaboração Própria.

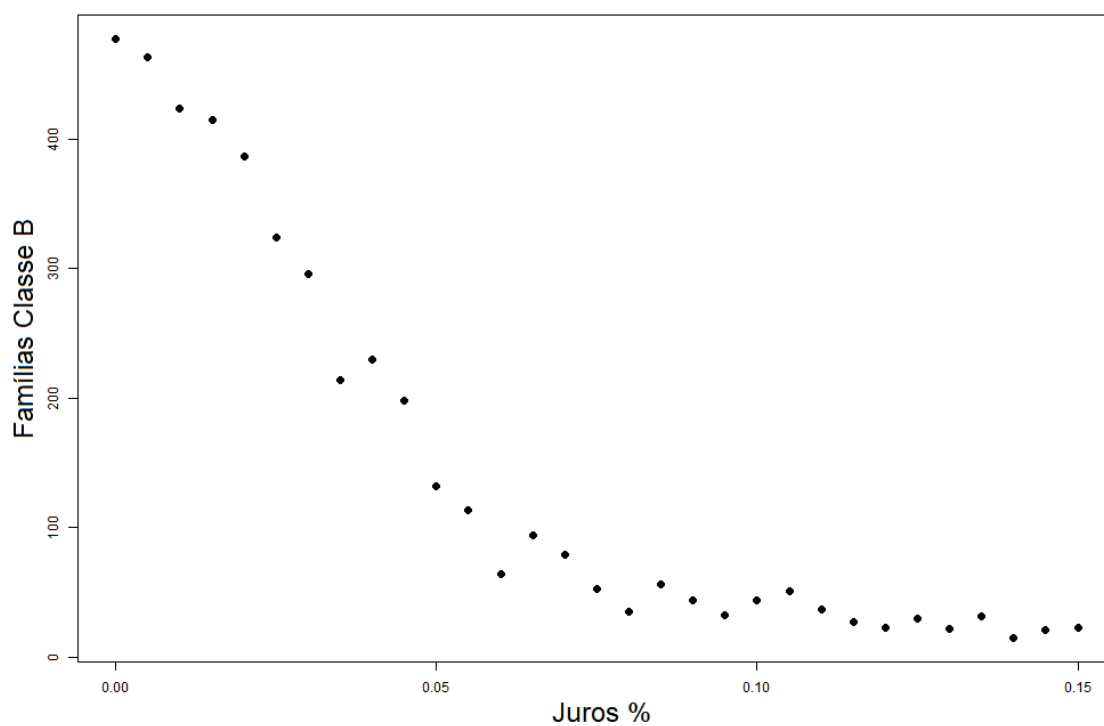
Pode-se perceber pelas Figuras 4.24 e 4.25 que o modelo é sensível a políticas monetárias. Isso ocorre porque quanto maior a taxa de juros da economia menor será a atratividade dos investimentos em geração fotovoltaica para as famílias, ou seja, caso o governo queira fazer uma política ativa para facilitar a difusão dos sistemas fotovoltaicos um dos aspectos que ele deve considerar a taxa de juros. Em momentos de política monetária contracionista, quando o governo sobe as taxas de juros, o resultado pode ser negativo sobre a difusão dos sistemas fotovoltaicos.

Figura 4.26: Resultado Final dos Adotantes da Classe A para Diferentes taxas de Juros



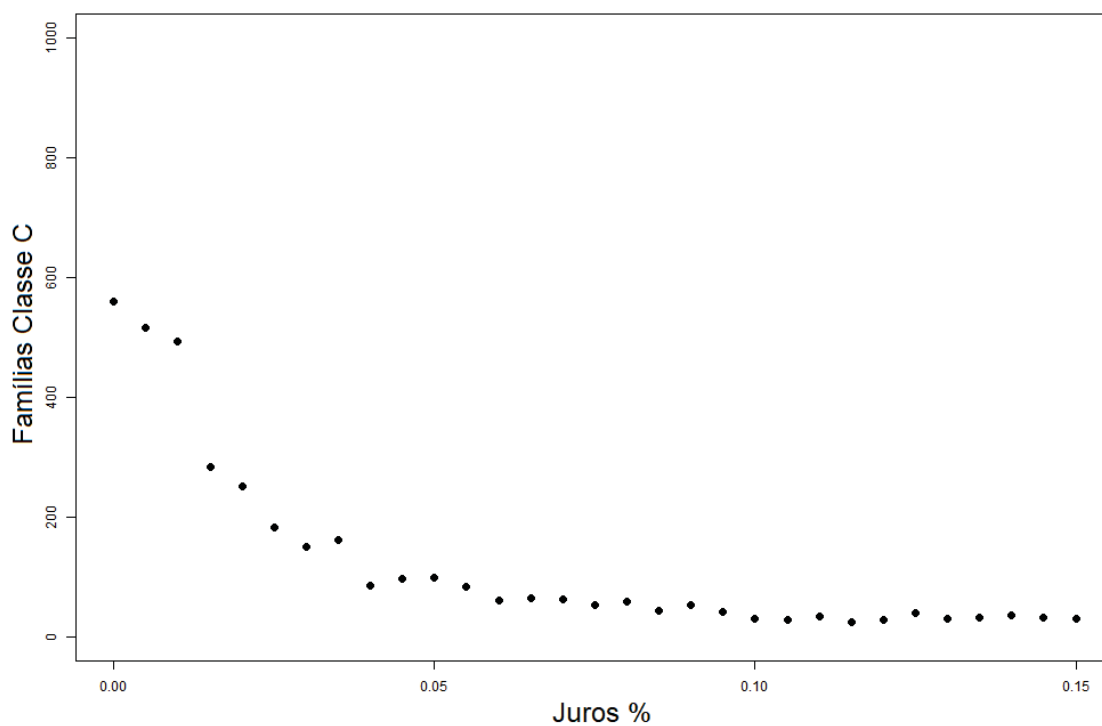
Fonte: Elaboração Própria.

Figura 4.27: Resultado Final dos Adotantes da Classe B para Diferentes taxas de Juros



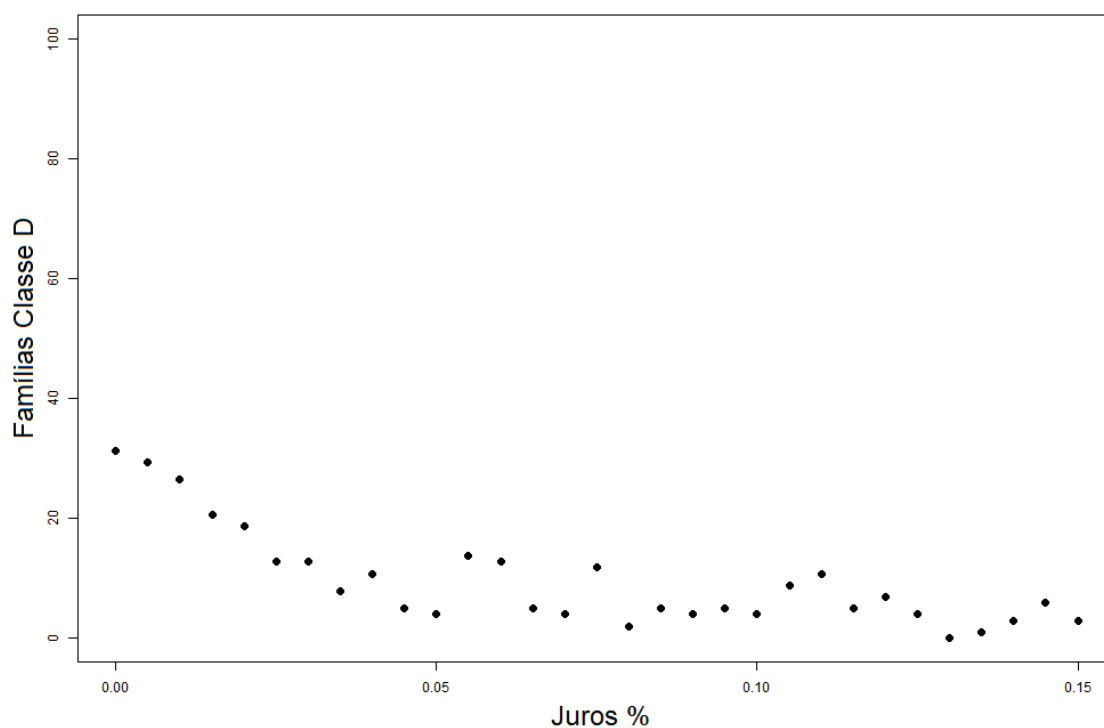
Fonte: Elaboração Própria.

Figura 4.28: Resultado Final dos Adotantes da Classe C para Diferentes taxas de Juros



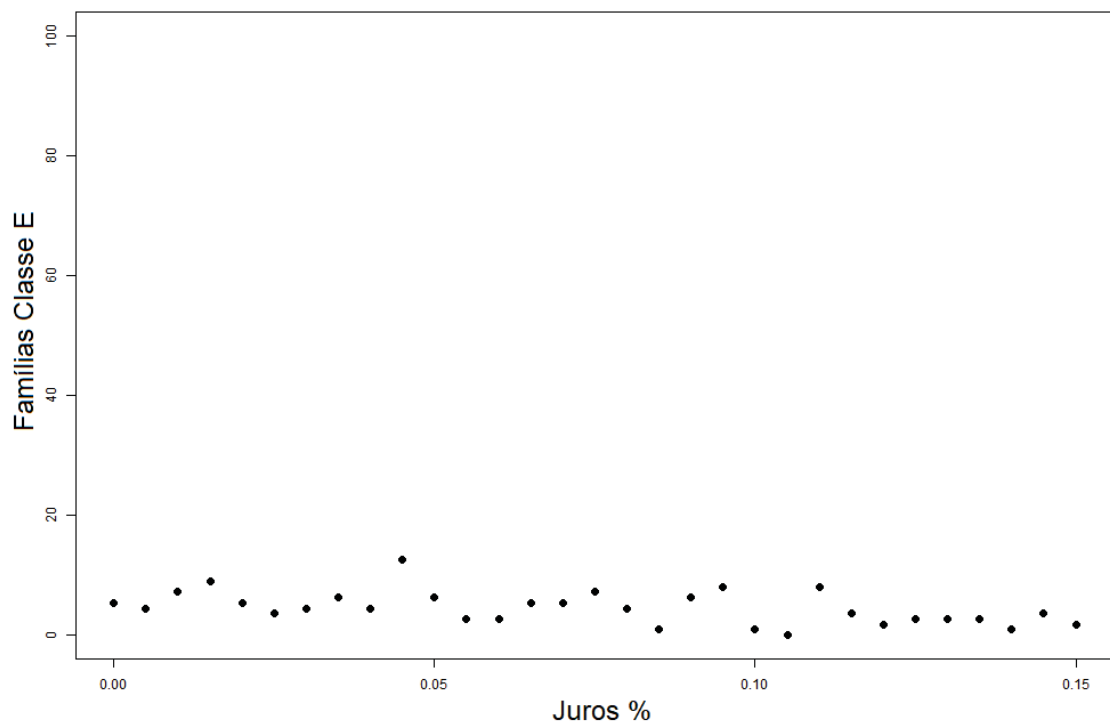
Fonte: Elaboração Própria.

Figura 4.29: Resultado Final dos Adotantes da Classe D para Diferentes taxas de Juros



Fonte: Elaboração Própria.

Figura 4.30: Resultado Final dos Adotantes da Classe E para Diferentes taxas de Juros



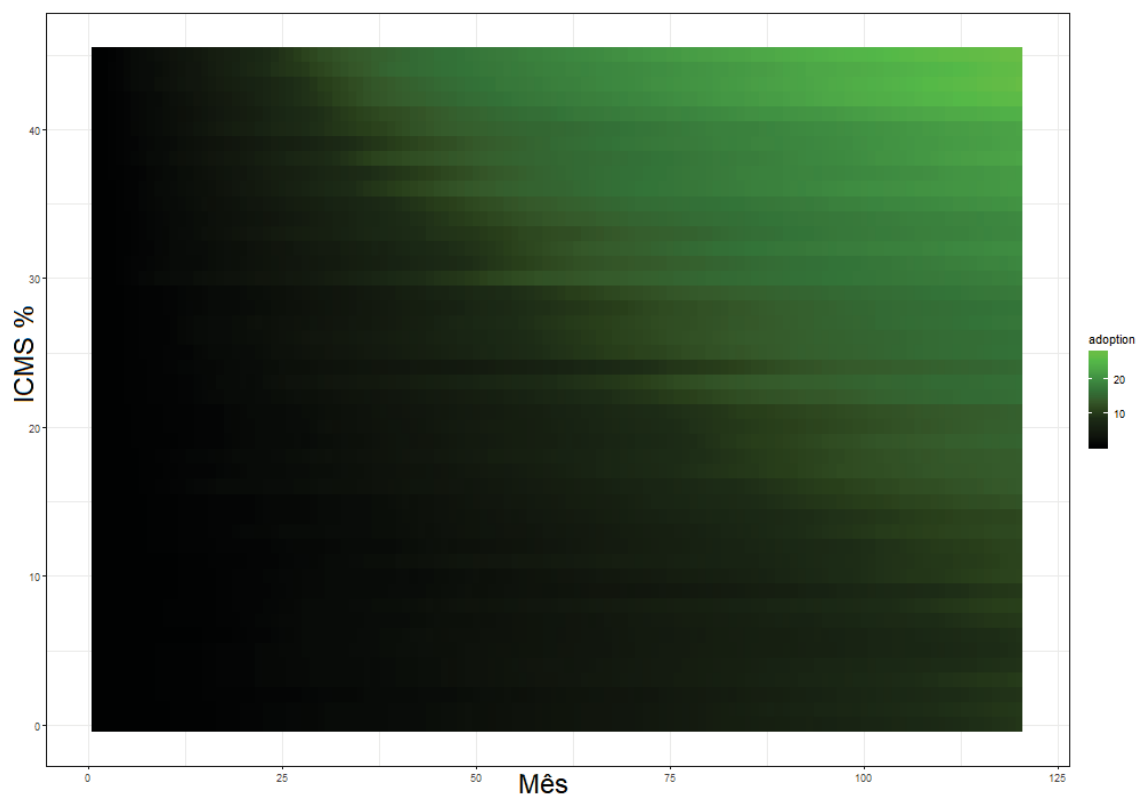
Fonte: Elaboração Própria.

Ao analisar as Figuras, 4.26, 4.27, 4.28, 4.29 e 4.30 nota-se que cada classe social tem resposta a taxa de juros em momentos diferentes. Esse resultado pode ser explorado como política ativa do estado caso haja o interesse em incentivar uma determinada classe social a adotar os sistemas fotovoltaicos. Como foi visto na análise da simulação base uma das grandes barreiras para uma maior difusão da energia fotovoltaica é a dificuldade de penetrar essa tecnologia entre as classes mais baixas. Políticas específicas para cada classe podem apresentar resultados satisfatórios com menores custos do que se fossem implementados para toda a sociedade.

4.3.2 Variações no ICMS da Tarifa de Energia

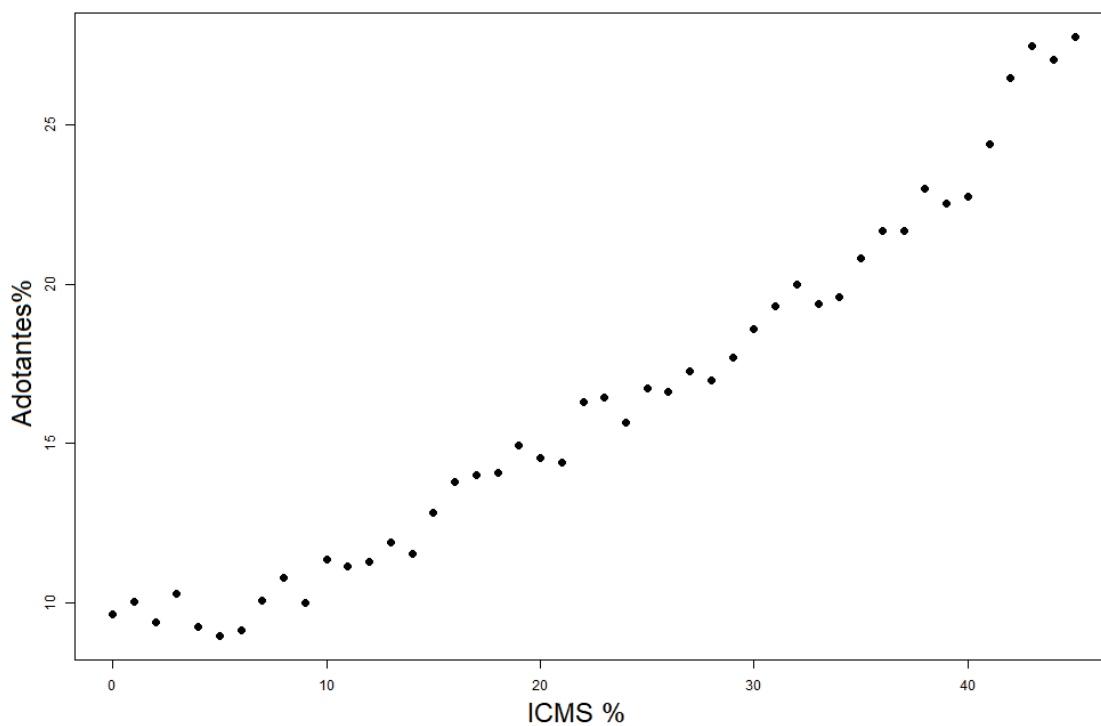
As Figuras 4.31 e 4.32 apresentam a sensibilidade do modelo ao ICMS cobrado nas tarifas de energia. Quanto maior a parcela cobrada pelo estado, maior será o incentivo da população a investir em sistemas de geração própria, uma vez que estes reduzirão as contas de energia. É importante perceber que como a geração só pode ser abatida do total consumido no sistema brasileiro, isso cria uma relação direta entre a geração e carga de cada família, caso o governo queira baixar drasticamente as tarifas de energia, ele deverá estar ciente que isso pode ter impactos na difusão da geração solar. Uma das soluções para este caso seria permitir que as famílias vendessem, sem estarem limitadas a quantidades de energia consumida pelas mesmas.

Figura 4.31: Evolução do Percentual de Adotantes para Diferentes Alíquotas de ICMS



Fonte: Elaboração Própria.

Figura 4.32: Resultado Final dos Adotantes para Diferentes Alíquotas de ICMS

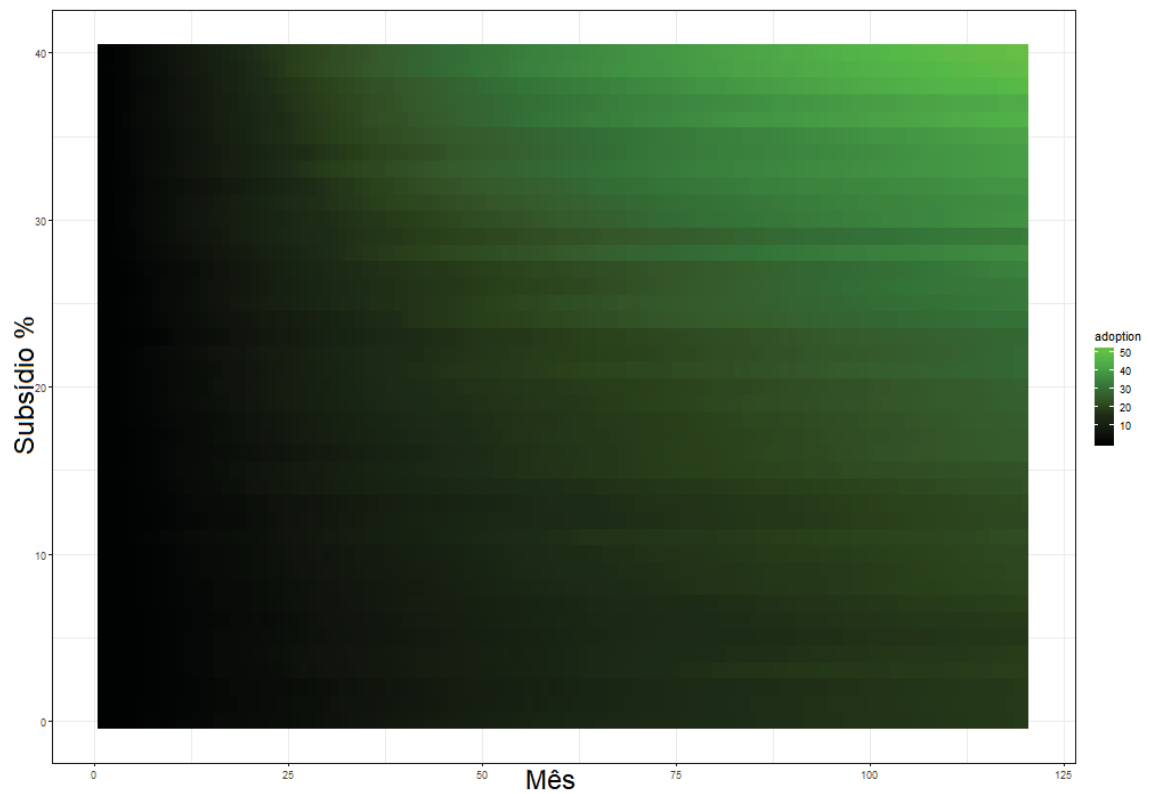


Fonte: Elaboração Própria.

4.3.3 Subsídios no Preço do Sistema Fotovoltaico

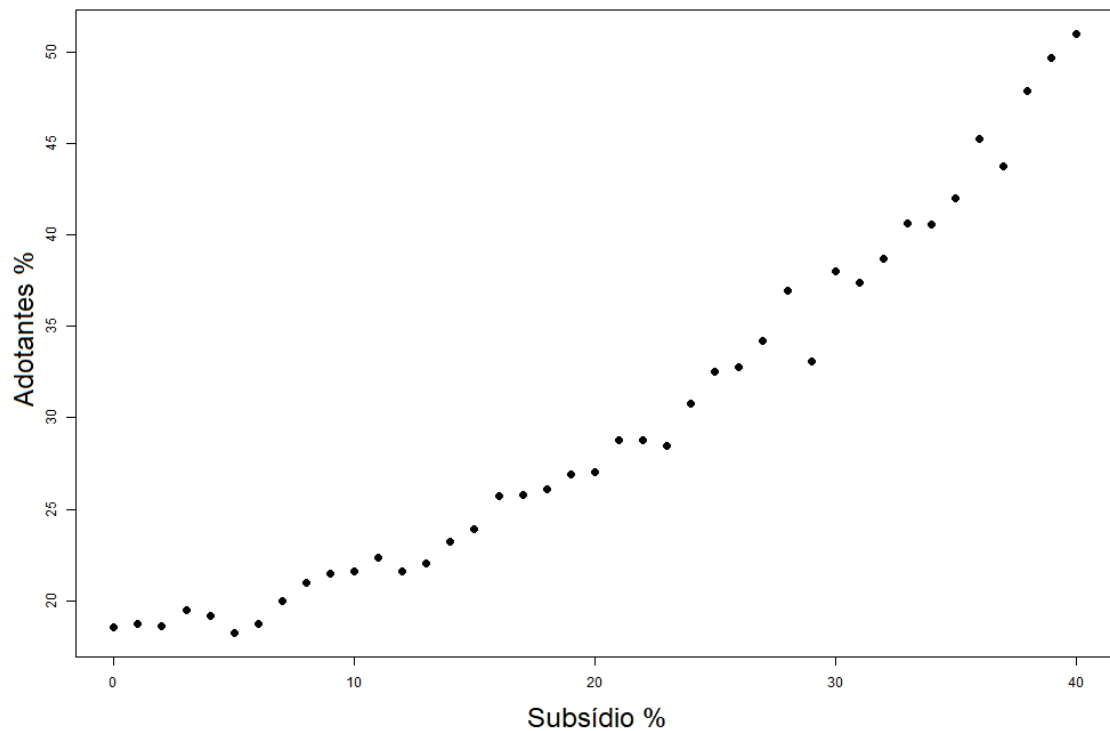
Outra possível política que poderia ser implementada para facilitar a difusão da geração solar entre as residências são um subsídio no preço do próprio sistema fotovoltaico. As Figuras 4.33 e 4.34 apresentam a evolução e resultado de diferentes taxas de subsídios no preço do sistema.

Figura 4.33: Evolução do Percentual de Adotantes para Diferentes Taxas de Subsídios



Fonte: Elaboração Própria.

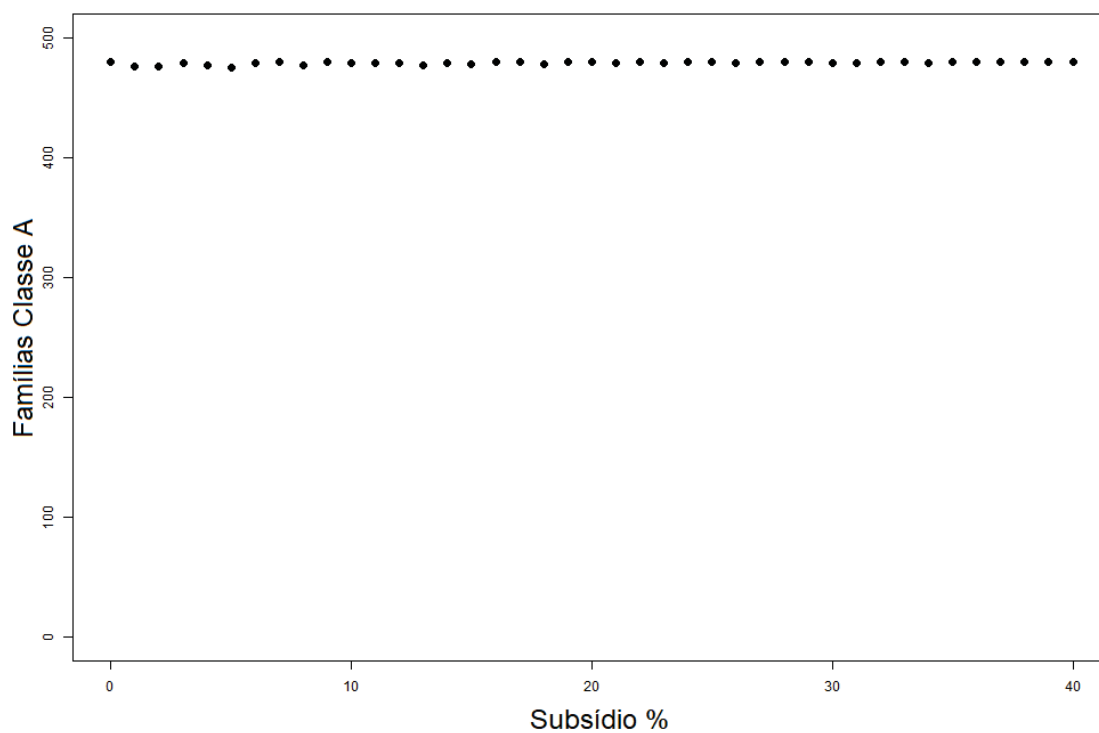
Figura 4.34: Resultado Final dos Adotantes para Diferentes Taxas de Subsídios



Fonte: Elaboração Própria.

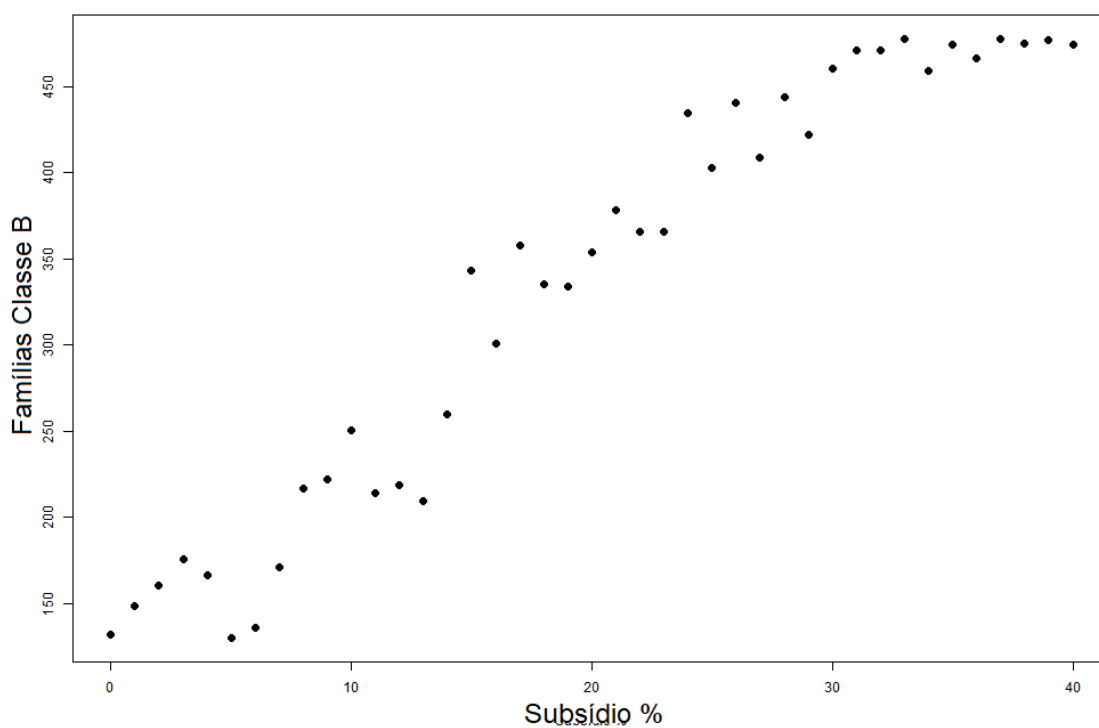
Quanto maiores as taxas de subsídios, maior será a adoção dos sistemas. O subsídio pode apresentar de diferentes formas, linhas de crédito, redução tributaria nas peças e equipamentos do sistema fotovoltaico, nas tarifas de importação dos componentes do sistema que não produzidos nacionalmente, nos incentivos fiscais e muitas outras formas. Dessa maneira o governo assume parte dos custos na implementação dos sistemas fotovoltaicos e, em contrapartida, as famílias produzirão energia, um insumo básico para grande parte da indústria podendo até reduzindo os custos de produção de alguns bens e aumentar o emprego e a renda do país dependendo da escala. Além de diversificar a matriz energética tornando o país menos dependente de algumas fontes de energia convencionais.

Figura 4.35: Resultado Final dos Adotantes da Classe A para Diferentes Taxas de Subsídios



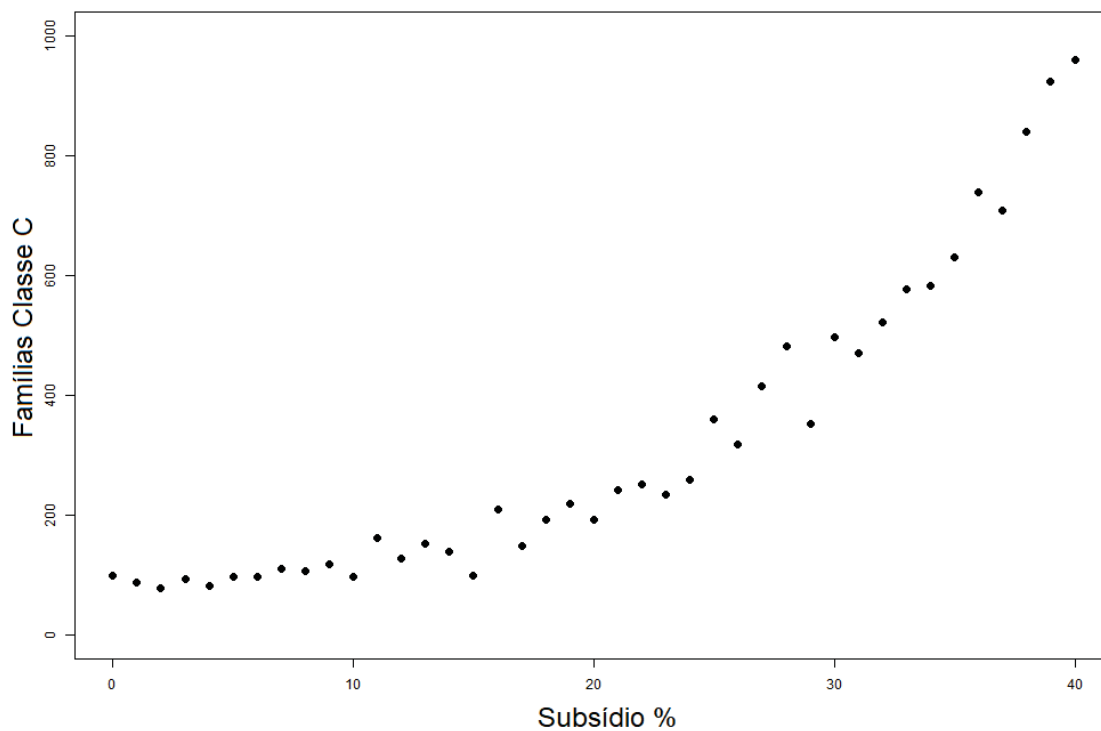
Fonte: Elaboração Própria.

Figura 4.36: Resultado Final dos Adotantes da Classe B para Diferentes Taxas de Subsídios



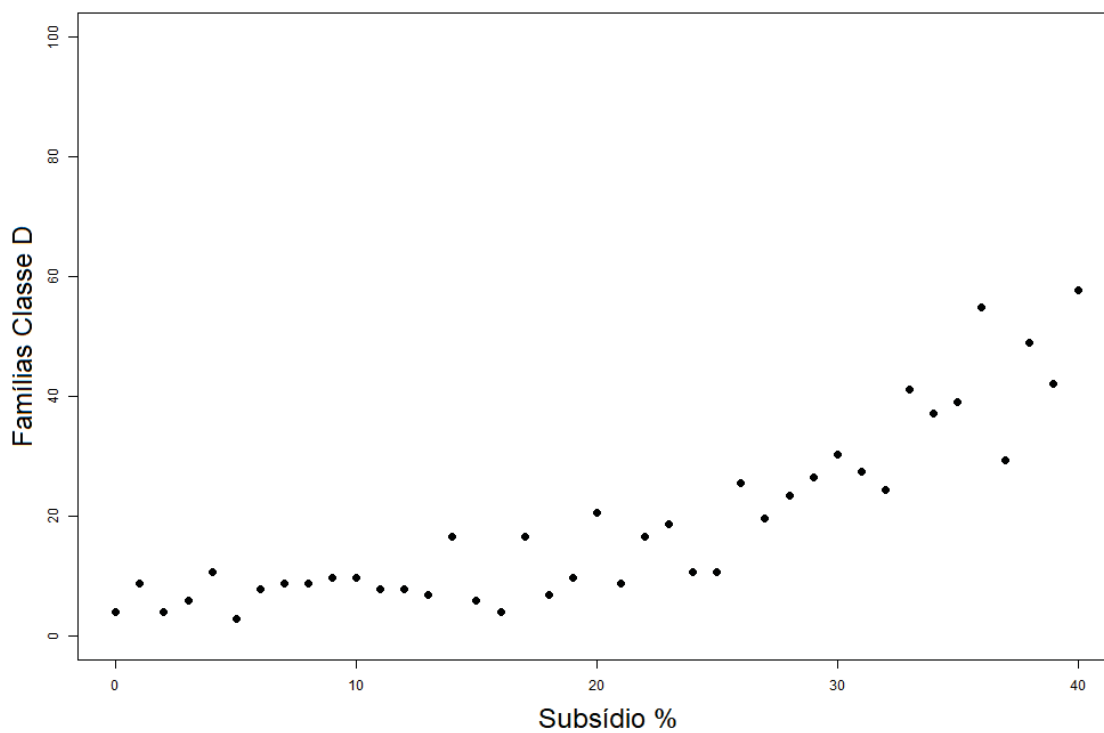
Fonte: Elaboração Própria.

Figura 4.37: Resultado Final dos Adotantes da Classe C para Diferentes Taxas de Subsídios



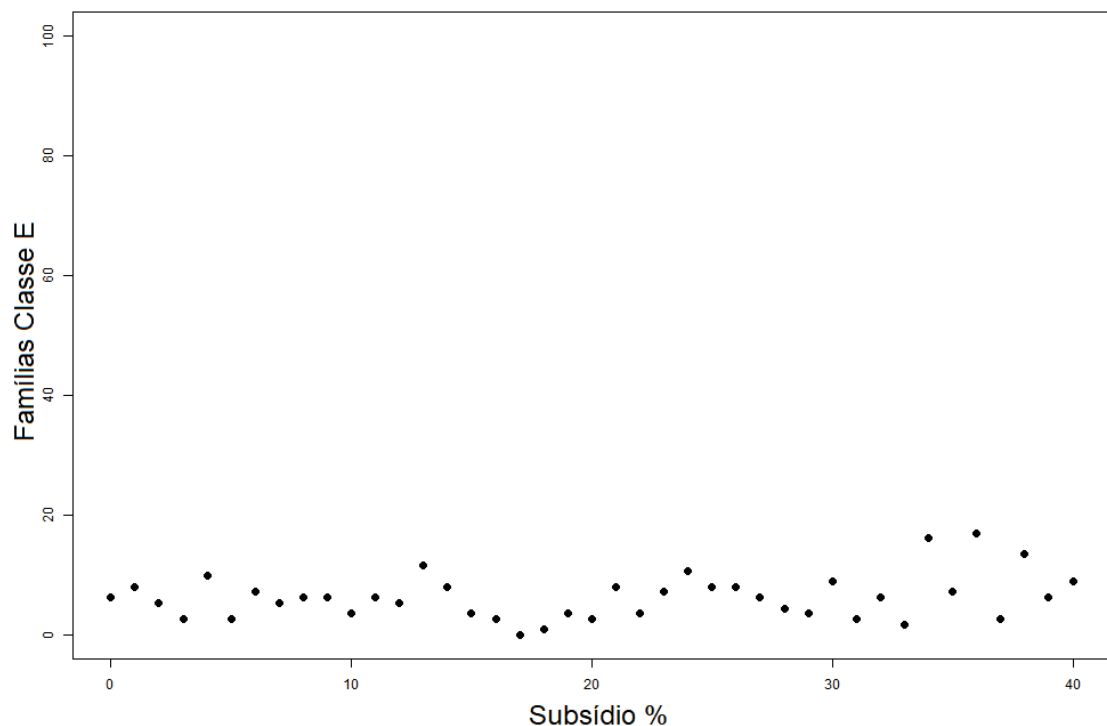
Fonte: Elaboração Própria.

Figura 4.38: Resultado Final dos Adotantes da Classe D para Diferentes Taxas de Subsídios



Fonte: Elaboração Própria.

Figura 4.39: Resultado Final dos Adotantes da Classe E para Diferentes Taxas de Subsídios



Fonte: Elaboração Própria.

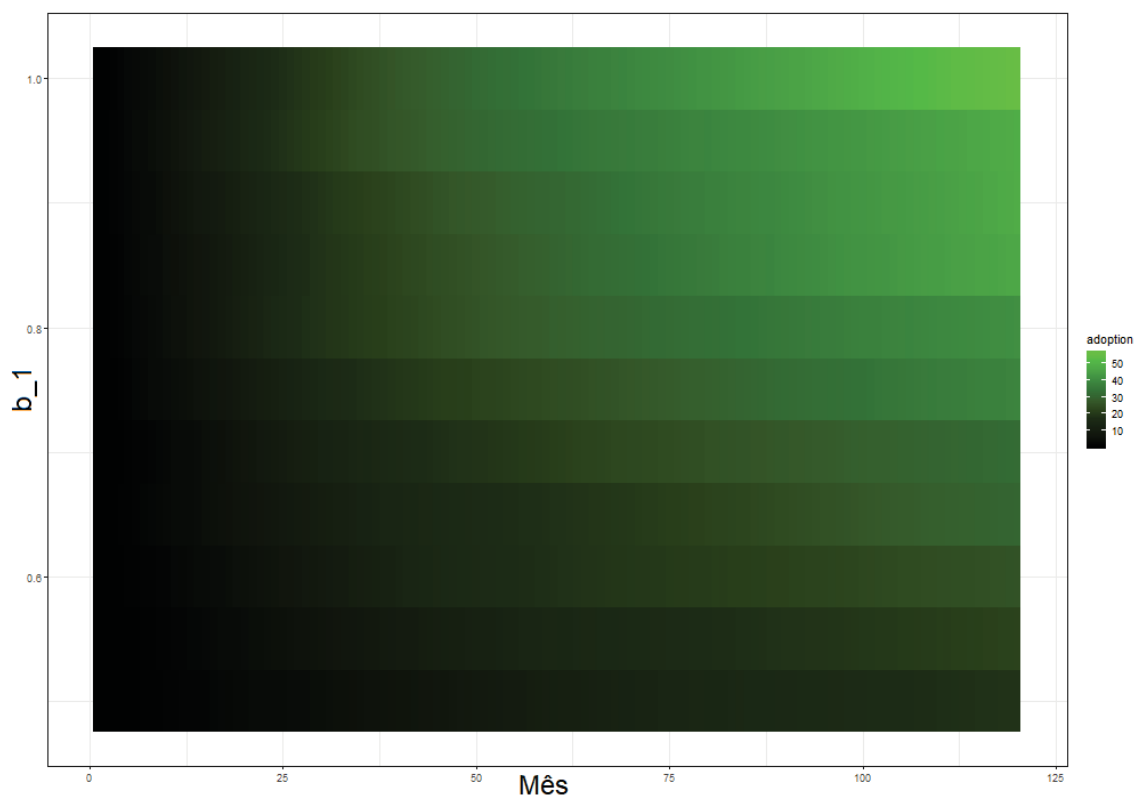
Como pode ser apresentado nas Figuras 4.35, 4.36, 4.37, 4.38 e 4.39 o valor do subsídio tem impactos vários nas diferentes classes sociais. Uma maneira de não tornar tão oneroso para governo subsidiar todos os sistemas fotovoltaicos, é que ele pode escolher o grupo de famílias que é mais sensível ao subsídio para dar incentivos, reduzindo o seus custos ao implementar essa política e aumentar a efetividade dos seus gastos. Além disso, é possível calcular qual seria o grupo e o subsídio ideal para atingir um determinado padrão de difusão e avaliar os custos de antemão para o governo.

4.3.4 Fixar o Valor do Preço de Venda da Energia Solar Gerada Pelas Residências

Uma possível política pública é fixar os preços pelo qual as famílias vendem energia para as concessionárias acima do preço das tarifas de energia das residências. Uma justificativa plausível para isso, além de incentivar a difusão dos sistemas fotovoltaicos é que existe uma série de vantagens sociais e ambientais ao estimular a produção de energias de fontes limpas. Então o gasto por se pagar a mais por essa matriz energética pode ser compensado indiretamente pelos benefícios para a sociedade.

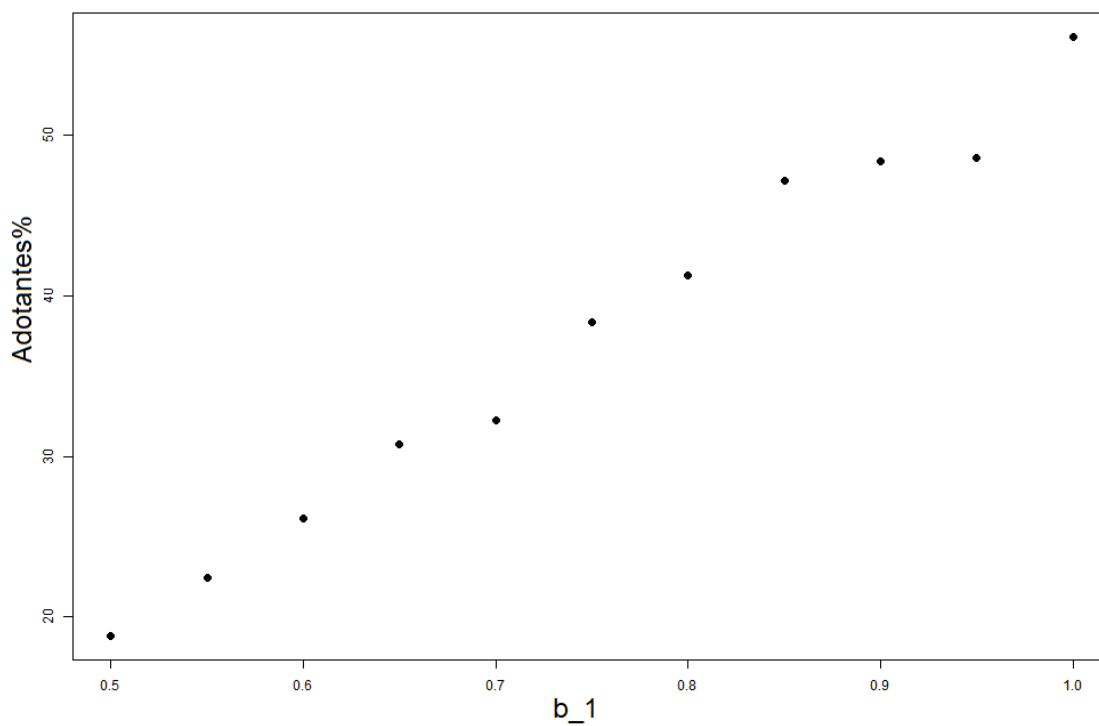
As Figuras 4.40 e 4.41 apresentam a sensibilidade adoção dos sistemas fotovoltaicos as diferentes faixas de preço para a venda da energia solar:

Figura 4.40: Evolução do Percentual de Adotantes para Diferentes Preços de Venda



Fonte: Elaboração Própria.

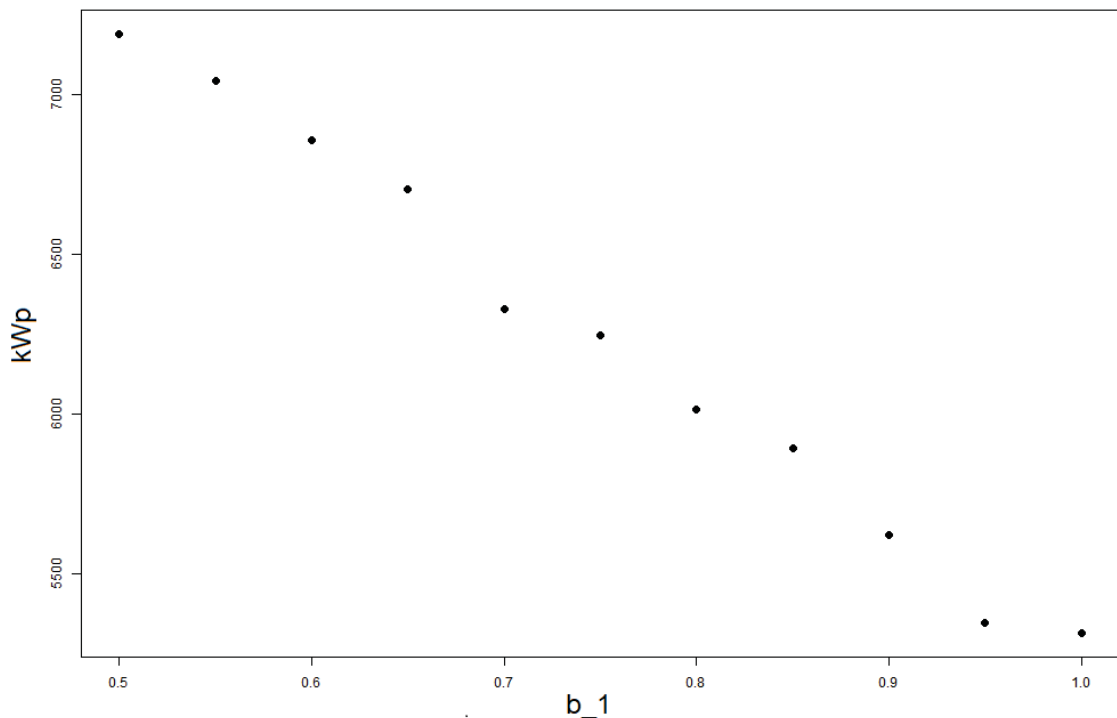
Figura 4.41: Resultado Final dos adotantes para para Diferentes Preços de Venda



Fonte: Elaboração Própria.

Quanto maior é o preço da energia, mais residências adotam o sistema, por ser cada vez ser mais rentável para as famílias. Por outro lado, os dados da Figura 4.42 apresentam que quanto maior o preço da energia solar no mercado, menor será a capacidade instalada pelas residências. Como os agentes tendem a zerar a conta de energia elétrica no modelo, se o preço da energia produzida pelas residências é maior que a consumida as famílias vão precisar produzir menos energia para abater na conta no final do mês, reduzindo assim a necessidade de investir nos sistemas e gerando menos energia. Dessa forma, essa política para o caso brasileiro tem um efeito dúbio, aumenta-se a quantidade de lares com geração solar, mas a capacidade instalada de cada um será menor. Uma boa forma de usar dessa política é aplicá-la apenas por um curto período, fazendo com que mais famílias adotem a geração fotovoltaica num primeiro momento o que facilitará os agentes a alcançarem a massa crítica e pelo efeito das redes sociais a difusão continuará aumentando em um ritmo acelerado.

Figura 4.42: Capacidade Total Instalada para Diferentes Preços de Venda

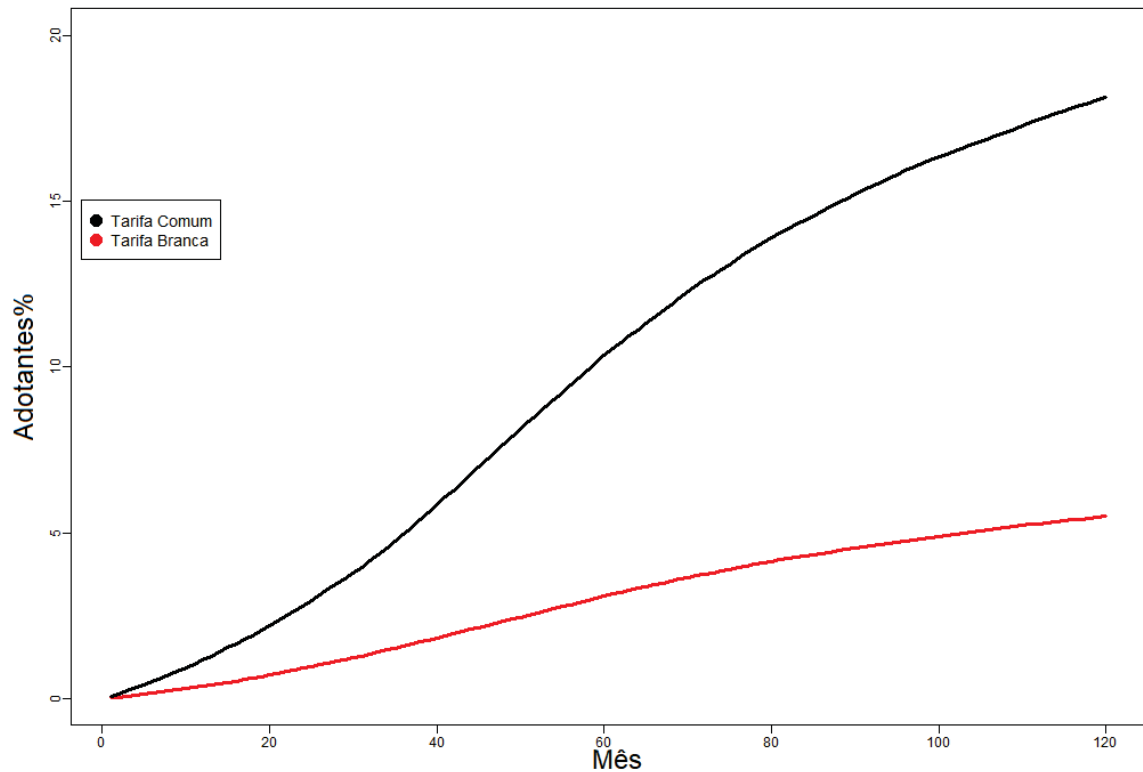


Fonte: Elaboração Própria.

4.3.5 Diferentes Tipos de Tarifas Energia

Ao comparar o modelo aplicando a tarifa comum e a branca, percebe-se pelas Figuras 4.43 que a difusão dos sistemas fotovoltaicos é muito maior no caso da tarifa comum. Isso ocorre porque quando se aplica a tarifa branca as famílias recebem pouco na geração em relação ao que elas pagam no horário de pico da carga. Isso faz com que elas tenham de investir mais para conseguir abater a sua conta de energia, tornando assim os sistemas menos atrativos.

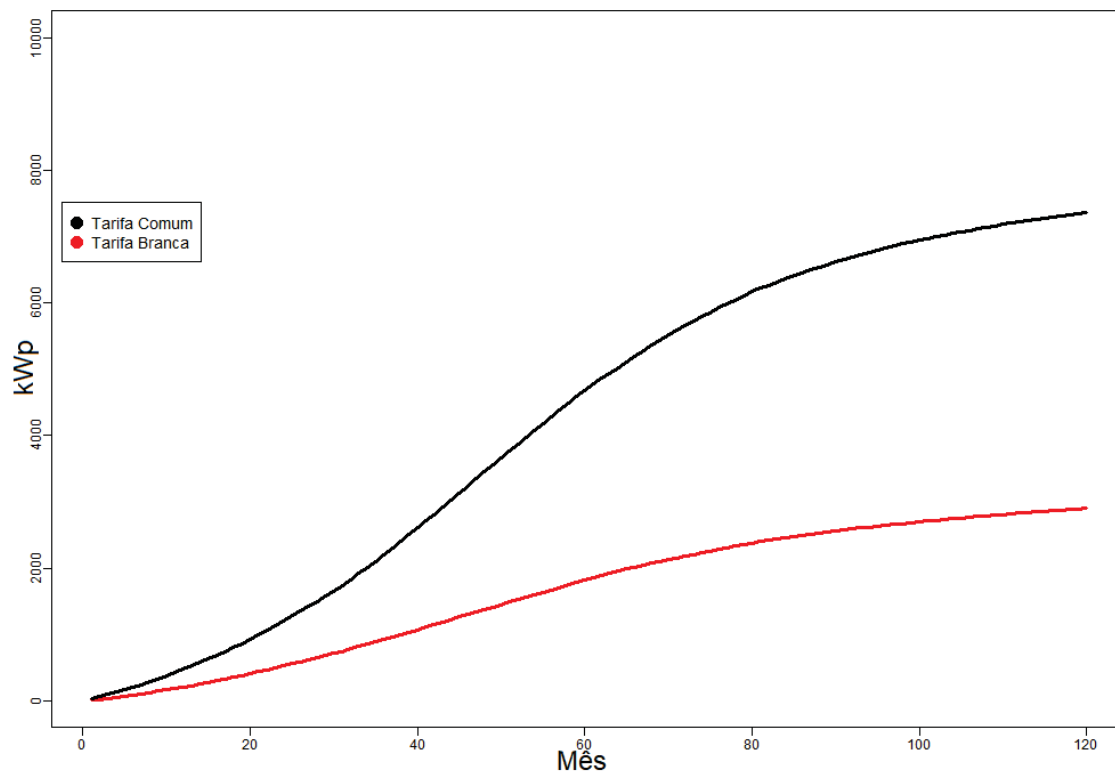
Figura 4.43: Percentual de Adotantes para Diferentes Tarifas de Energia



Fonte: Elaboração Própria.

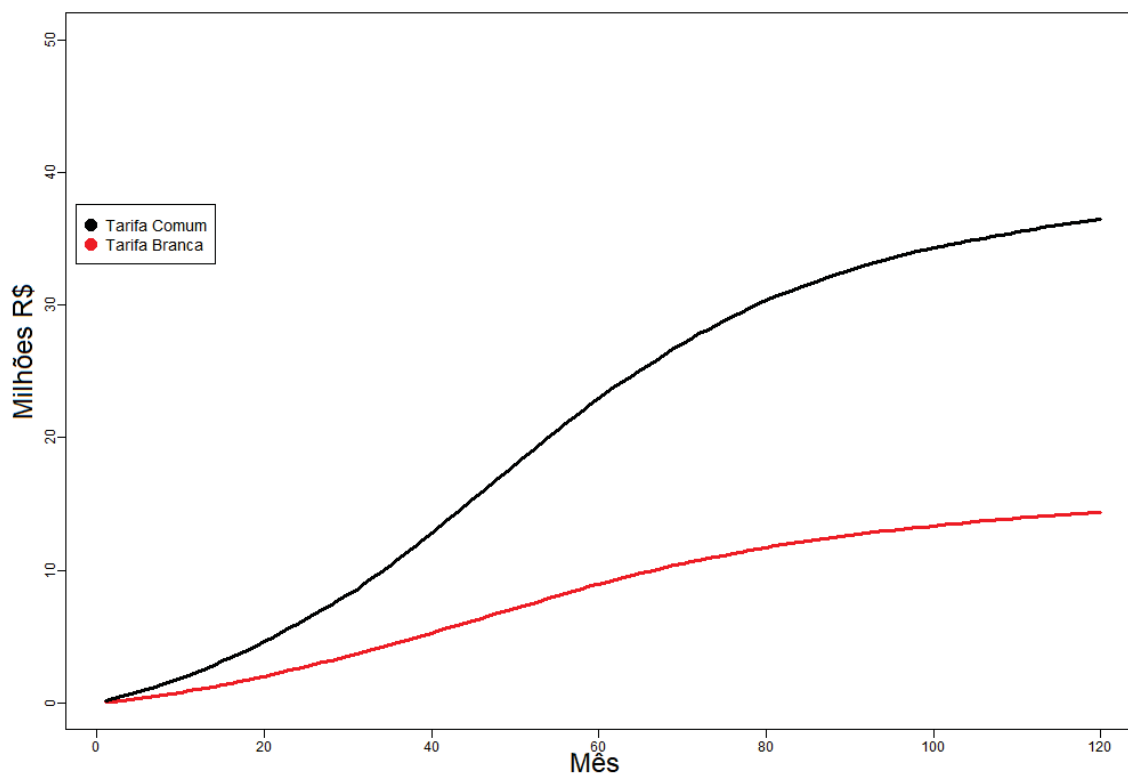
Como pode ser visto nas Figuras 4.44 e 4.45 quando se aplica a tarifa branca, o investimento e a capacidade instalada são proporcionalmente menores no agregado, mesmo que por adotantes os valores sejam maiores, uma vez que as famílias têm que investir mais para cobrir o gasto que elas têm consumido energia no horário de pico. O modelo não considera a mudança no hábito das famílias caso a tarifa branca seja adotada, além de não contar com baterias no sistema fotovoltaico, o que poderia ser uma solução plausível. Nesse caso, as residências poderiam vender a energia no horário de pico o que aumentariam as suas receitas. Com o escopo atual do modelo a difusão dos sistemas fotovoltaicos é comprometida caso seja implementado a tarifa branca.

Figura 4.44: Capacidade Instalada para Diferentes Tarifas de Energia



Fonte: Elaboração Própria.

Figura 4.45: Investimento Total das Famílias para Diferentes Tarifas de Energia



Fonte: Elaboração Própria.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho, utilizou-se uma estrutura de modelagem baseada em agentes para avaliar a difusão de sistemas fotovoltaicos, os impactos no sistema elétrico e o impacto dentro de uma área urbana. Com o modelo híbrido proposto (nível físico e econômico) tornou possível simular detalhes complexos das respostas das pessoas a incentivos com base em vários fatores, bem como em vários cenários de política pública. Com base nos resultados gerados a partir dos experimentos, governos e outras organizações podem estabelecer incentivos adequados para propiciar a adoção de sistemas fotovoltaicos. Do ponto de vista da análise das políticas públicas, mesmo sendo um modelo estilizado, os resultados encontrados podem direcionar as concessionárias e os governos em possíveis caminhos para solucionar os problemas gerados pela crescente demanda de energia nas áreas urbanas.

Um dos fatores que mais chamou a atenção nos resultados foi a dificuldade da difusão tecnológica entre as classes C, D e E. Como o modelo representa uma sociedade muito desigual, grande parte da sua população tem níveis de renda muito baixo em relação às classes mais altas. Isso dificulta a difusão dos sistemas fotovoltaicos em todos os estratos sociais, como foi explorado na seção de 4.3. Diferentes políticas públicas têm impactos variados entre as classes sociais, para um formulador de políticas públicas são importantes ferramentas teóricas que consigam captar essas nuances. Caso o governo queira incentivar a difusão desses sistemas em diferentes regiões para diferentes propostas, é preciso entender como ocorre a difusão nesses grupos e quais são as medidas mais eficazes para favorecer a adoção em cada um deles. Outro ponto importante é que as políticas públicas focalizadas em um determinado grupo costumam ser mais baratas por não se estender a toda população, além de promover a justiça social dando mais oportunidade a quem tem menos.

O modelo fornece uma estrutura interna sólida, para validação da robustez dessas estruturas. Houve a análise de sensibilidade de diversos parâmetros e dentro dessas análises o modelo não apresentou resultados desconexos. Com isso, foi possível analisar diferentes mecanismos de políticas com essa estrutura, o que facilita a compreensão dos impactos das mesmas dentro de um ambiente simulado.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Esse é um modelo teórico com alguns pressupostos rígidos a serem flexibilizados futuramente. Algumas estruturas são assumidas de forma rígida como, por exemplo, a renda e perfil que podem no futuro ser estimado com base em dados empíricos. Outro ponto a avançar é a cidade estilizada que atualmente é pouco realista e estática ao longo dos anos, não apresentando crescimento e diferentes adensamentos populacionais, fronteiras reais ou outros pontos de carga como comércio, governo e indústria e uma rede elétrica mais detalhada.

Além disso, o modelo gera dados espaciais que não foram explorados exaustivamente, abrindo margem para mais análises estatísticas mesmo dentro do modelo base.

Outro ponto não explorado na dissertação são os custos e a possibilidade de expansão e melhoramento da rede elétrica. Como esse modelo apresenta quais barras ultrapassam o limite de tensão permitido e em qual período do tempo, é possível calcular os investimentos associados a esses fatores, e com isso, toda uma discussão sobre quem arcaria com os custos de estabilização do sistema elétrico. Além disso, no Brasil as concessionárias podem acumular tarefas, sendo não apenas distribuidoras, mas também em alguns casos, geradoras de energia. Com isso, para elas,

a geração distribuída das famílias tem um caráter ambíguo, podendo ser benéficas por reduzir os custos de levar energia a regiões de difícil abastecimento, evitando multas e reduzindo os gastos com investimentos, mas também pode ser prejudicial aos lucros quando abre competição com as geradoras convencionais. A análise de como o governo, os indivíduos e as concessionárias podem interagir nesse mercado são relevantes no estudo da difusão dessa tecnologia.

Por fim, é possível analisar outras tecnologias se difundindo conjuntamente com a geração distribuída solar como, por exemplo, o uso de baterias para armazenar a energia gerada durante o dia para ser utilizada em horários de pico de carga, o que abre margem para muitas outras análises. Ainda em relação aos produtos, poderiam ser analisados diferentes sistemas fotovoltaicos com variações entre os preços e as capacidades de geração competindo nesse mercado.

REFERÊNCIAS

- ABEP (2018). Critério padrão de classificação econômica and filiadas. <http://www.abep.org>. Associação Brasileira de Empresas de Pesquisa - Acessado em 23-01-2019.
- Abramovay, R. (2004). Entre deus e o diabo: mercados e interação humana nas ciências sociais. *Tempo social*, 16(2):35–64.
- ANEEL (2010). Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional.
- ANEEL (2016). Relatório 2015. <http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/RELATORIO> Acessado em 13-11-2018.
- ANEEL (2017). Balanço energético nacional. Agência Nacional de Energia Elétrica, Acessado em 15-01-2019.
- ANEEL (2019). Capacidade Brasil. Agência Nacional de Energia Elétrica, Acessado em 15-01-2019.
- Baldi, M. e Vieira, M. M. F. (2006). Calçado do vale: imersão social e redes interorganizacionais. *Revista de Administração de Empresas*, 46(3):16–27.
- Barabási, A.-L. (2003). Linked: The new science of networks.
- Bass, F. M. (1969). A new product growth for model consumer durables. *Management science*, 15(5):215–227.
- Benedito, R. d. S. (2009). *Caracterização da geração distribuída de eletricidade por meio de sistemas fotovoltaicos conectados à rede, no Brasil, sob os aspectos técnico, econômico e regulatório*. Tese de doutorado, Universidade de São Paulo.
- Birol, F. et al. (2017). World energy outlook. Paris: International Energy Agency.
- Buchanan, T. A., Xiang, A. H., Peters, R. K., Kjos, S. L., Marroquin, A., Goico, J., Ochoa, C., Tan, S., Berkowitz, K., Hodis, H. N. et al. (2002). Preservation of pancreatic β -cell function and prevention of type 2 diabetes by pharmacological treatment of insulin resistance in high-risk hispanic women. *Diabetes*, 51(9):2796–2803.
- Cabello, A. F. e Pompermayer, F. M. (2013). Energia fotovoltaica ligada à rede elétrica: atratividade para o consumidor final e possíveis impactos no sistema elétrico.
- Cabral, I. e Vieira, R. (2012). Viabilidade econômica x viabilidade ambiental do uso de energia fotovoltaica no caso brasileiro: uma abordagem no período recente. Em *III Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental*, volume 19.
- Cantono, S. e Silverberg, G. (2009). A percolation model of eco-innovation diffusion: the relationship between diffusion, learning economies and subsidies. *Technological forecasting and social change*, 76(4):487–496.
- Carrington, P. J., Scott, J. e Wasserman, S. (2005). *Models and methods in social network analysis*, volume 28. Cambridge university press.

- Chow, G. C. (1967). Technological change and the demand for computers. *The American Economic Review*, páginas 1117–1130.
- Collier, M. (1998). Mobile agents and active networks: Complementary or competing technologies? *submitted to Infocom*, 99(3).
- COPEL (2019). Taxas e tarifas. <http://www.copel.com/hpcopel/root/nivel2.jsp?endereco=> Acessado em 27-01-2019.
- da Silva Souza, A. e da Silva, C. P. (2006). O consumo na vida de adolescentes de diferentes condições socioeconômicas: uma reflexão para o marketing no brasil. *Cadernos EBAPE. BR*, 4(1):1–18.
- Diamandis, P. H. e Kotler, S. (2012). *Abundance: The future is better than you think*. Simon and Schuster.
- do Nascimento, Maurício Reinert e de Oliveira, J. S. e. C. A. (2014). A influência da imersão social na constituição dos significados do consumo e na adoção de produtos tecnológicos por adolescentes: uma análise teórica a partir da sociologia econômica. *Perspectivas Contemporâneas*, 8(2).
- Douglas, M., Isherwood, B. e Dentzien, P. (2006). *O mundo dos bens: para uma antropologia do consumo*. UFRJ.
- Eletrobras (2015). Prestação de contas ordinária anual relatório de gestão do exercício 2014.
- Elfring, T. e Hulsink, W. (2007). Networking by entrepreneurs: Patterns of tie—formation in emerging organizations. *Organization Studies*, 28(12):1849–1872.
- Elgerd, O. I. e Happ, H. (1972). Electric energy systems theory: an introduction. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, (2):296–297.
- Epstein, J. M. e Axtell, R. (1996). *Growing artificial societies: social science from the bottom up*. Brookings Institution Press.
- Erdős, J. (1959). *A remark on the paper "On some functional equations" by S. Kurepa*.
- Erdoes, P. (1961). Intersection theorems for systems of finite sets. *Quart. J. Math. Oxford Ser.(2)*, 12:313–320.
- Faber, A., Valente, M. e Janssen, P. (2010). Exploring domestic micro-cogeneration in the netherlands: an agent-based demand model for technology diffusion. *Energy Policy*, 38(6):2763–2775.
- FGV (2014). Fundação getulio vargas social centro de políticas sociais. <https://cps.fgv.br/qual-faixa-de-renda-familiar-das-classes>. Acessado em 11-01-2019.
- Fourt, L. A. e Woodlock, J. W. (1960). Early prediction of market success for new grocery products. *The Journal of Marketing*, páginas 31–38.
- Francisquini, A. A. (2006). Estimacão de curvas de carga em pontos de consumo e em transformadores de distribuicão.
- Gilbert, N. (2008). *Researching social life*. Sage.

- Gilbert, N., Pyka, A., Ahrweiler, P. et al. (2001). Innovation networks-a simulation approach. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 4(3):1–13.
- Gilbert, N. e Troitzsch, K. (2005). *Simulation for the social scientist*. McGraw-Hill Education (UK).
- Glover, J., Sarma, M. e OVERBYE, T. (2002). Power system analysis and design, thomson learning. Inc., USA.
- Goldberg, D. E. e Holland, J. H. (1988). Genetic algorithms and machine learning. *Machine learning*, 3(2):95–99.
- Goldenberg, J., Libai, B. e Muller, E. (2001). Talk of the network: A complex systems look at the underlying process of word-of-mouth. *Marketing letters*, 12(3):211–223.
- Gomes, I., Pousinho, H., Melício, R. e Mendes, V. M. F. (2017). Stochastic coordination of joint wind and photovoltaic systems with energy storage in day-ahead market. *Energy*, 124:310–320.
- Grainger, J. J. e Stevenson, W. D. (1994). *Power system analysis*, volume 67. McGraw-Hill New York.
- Granovetter, M. (1985). Economic action and social structure: The problem of embeddedness. *American journal of sociology*, 91(3):481–510.
- Hagfeldt, A., Boschloo, G., Sun, L., Kloo, L. e Pettersson, H. (2010). Dye-sensitized solar cells. *Chemical reviews*, 110(11):6595–6663.
- Hall, R. H. (2004). *Organizações: estruturas, processos e resultados*. Pearson.
- Hong, S., Chung, Y. e Woo, C. (2015). Scenario analysis for estimating the learning rate of photovoltaic power generation based on learning curve theory in south korea. *Energy*, 79:80–89.
- Jannuzzi, G. D. M. (2005). Power sector reforms in brazil and its impacts on energy efficiency and research and development activities. *Energy policy*, 33(13):1753–1762.
- Jannuzzi, G. d. M., Varella, F. K. e Gomes, R. D. M. (2009). Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica no brasil: panorama da atual legislação. *International Energy Initiative para an América Latina (IEI-LA) e Universidade Estadual de Campinas (Unicamp)*.
- Kiesling, E., Günther, M., Stummer, C. e Wakolbinger, L. M. (2012). Agent-based simulation of innovation diffusion: A review. *Central European Journal of Operations Research*, 20(2):183–230.
- Kowaltowski, T. (1996). Von neumann: suas contribuições à computação. *Estudos Avançados*, 10(26):237–260.
- Krackhardt, D. e Brass, D. J. (1994). *Intraorganizational networks*. Thousand Oaks, CA: Sage.
- Lagacé, P. J. (2012). Power flow methods for improving convergence. Em *IECON 2012-38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, páginas 1387–1392. IEEE.
- Leão, R., Barroso, G., Sampaio, R., Almada, J., Lima, C., Rego, M. e Antunes, F. (2011). The future of low voltage networks: Moving from passive to active. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 33(8):1506–1512.

- Luque, A. e Hegedus, S. (2003). *Photovoltaic science and engineering*. Wiley Online Library.
- Machado, C. T. e Miranda, F. S. (2014). Energia solar fotovoltaica: uma breve revisão. *Revista Virtual de Química*, 7(1):126–143.
- Mahajan, A. K. (1990). *The A/A-bar distinction and movement theory*. Tese de doutorado, Massachusetts Institute of Technology.
- Mahajan, V., Muller, E. e Bass, F. M. (1990). New product diffusion models in marketing: A review and directions for research. *Journal of marketing*, 54(1):1–26.
- Mahler, A. e Rogers, E. M. (1999). The diffusion of interactive communication innovations and the critical mass: the adoption of telecommunications services by german banks. *Telecommunications policy*, 23(10-11):719–740.
- Mansfield, E. (1961). Technical change and the rate of imitation. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, páginas 741–766.
- Mauss, M. (2003). As técnicas do corpo. *Sociologia e antropologia*, 2.
- Mayfield, J. E. (2013). *The Engine of Complexity: Evolution as Computation*. Columbia University Press, New York-EUA.
- Menezes, H. R., dos Santos Silva, T., Cerqueira, S. S., Gomes, S. M. A., de Guimarães Anchieta, J. T. e Campos, A. (2018). Energia solar: Avaliação do nível de informação sobre o uso da energia solar e sua utilização no brasil. *Revista Cientifico*, 18(38):47–60.
- Milano, F. (2009). Continuous newton's method for power flow analysis. *IEEE Transactions on Power Systems*, 24(1):50–57.
- Milgram, S. (1967). The small world problem. *Psychology today*, 2(1):60–67.
- MIRANDA, V. (2012). A lei alemã de fontes renováveis de energia em confronto com a resolução normativa nº 482/2012 da aneel. *ED JANEIRO, Série Aperfeiçoamento de Magistrados*, páginas 128–137.
- Mitchell, M. (2009). *Complexity: A guided tour*. Oxford University Press.
- Niazi, M. e Hussain, A. (2011). Agent-based computing from multi-agent systems to agent-based models: a visual survey. *Scientometrics*, 89(2):479.
- Palmer, J., Sorda, G. e Madlener, R. (2015). Modeling the diffusion of residential photovoltaic systems in italy: An agent-based simulation. *Technological Forecasting and Social Change*, 99:106–131.
- Powell, W. W., Koput, K. W. e Smith-Doerr, L. (1996). Interorganizational collaboration and the locus of innovation: Networks of learning in biotechnology. *Administrative science quarterly*, páginas 116–145.
- Robinson, S. A., Stringer, M., Rai, V. e Tondon, A. (2013). Gis-integrated agent-based model of residential solar pv diffusion. Em *32nd USAEE/IAEE North American Conference*, páginas 28–31.
- Rogers, E. M. (2003). *The diffusion of innovation* 5th edition.

- Rogers, E. M. e Shoemaker, F. F. (1971). Communication of innovations; a cross-cultural approach.
- Schumpeter, J. A. (1961). The theory of economic development: An inquiry into profits, capital, credit, interest, and the business cycle (1912/1934). *Google Scholar*.
- Schwoon, M. (2006). Simulating the adoption of fuel cell vehicles. *Journal of Evolutionary Economics*, 16(4):435–472.
- Siebert, L. C., Sbicca, A., Aoki, A. R. e Lambert-Torres, G. (2017). A behavioral economics approach to residential electricity consumption. *Energies*, 10(6):768.
- Silva, J. S. d. (2016). Análise da influência da temperatura na geração de energia utilizando painéis fotovoltaicos monocristalinos e policristalinos.
- Singh, R. e Banerjee, R. (2016). Impact of solar panel orientation on large scale rooftop solar photovoltaic scenario for mumbai. *Energy Procedia*, 90:401–411.
- Solar, P. (2018). Quanto custa a energia solar fotovoltaica. <https://www.portalsolar.com.br/quanto-custa-a-energia-solar-fotovoltaica.html>. Acessado em 25-01-2019.
- Suppes, P., Pavel, M. e Falmagne, J.-C. (1994). Representations and models in psychology. *Annual review of psychology*, 45(1):517–544.
- Tiepolo, G. M., Junior, J. U., Pereira, Ê. B., Pereira, S. V. e Alves, A. R. (2016). Energia solar no estado do paraná-potencial, barreiras e políticas públicas. Em *X Congresso Brasileiro de Planejamento Energético–CBPE, Gramado-RS*.
- Veblen, T. (1899). The theory of the leisure class.(republished, 1934, by new york: Modern library).
- Virgilio, R. P. d. P. C. et al. (2009). *Solar energy in Portugal: Development perspectives based on a comparison with Germany*. Tese de doutorado.
- Wasserman, S. e Faust, K. (1994). *Social network analysis: Methods and applications*, volume 8. Cambridge university press.
- Watts, D. J. (2004). The “new” science of networks. *Annu. Rev. Sociol.*, 30:243–270.
- Watts, D. J. e Strogatz, S. H. (1998). Collective dynamics of ‘small-world’ networks. *nature*, 393(6684):440.
- Yue, D., You, F. e Darling, S. B. (2014). Domestic and overseas manufacturing scenarios of silicon-based photovoltaics: Life cycle energy and environmental comparative analysis. *Solar Energy*, 105:669–678.
- Zhang, T., Gensler, S. e Garcia, R. (2011). A study of the diffusion of alternative fuel vehicles: An agent-based modeling approach. *Journal of Product Innovation Management*, 28(2):152–168.
- Zhang, T. e Nuttall, W. J. (2011). Evaluating government’s policies on promoting smart metering diffusion in retail electricity markets via agent-based simulation. *Journal of Product Innovation Management*, 28(2):169–186.

- Zhao, J., Mazhari, E., Celik, N. e Son, Y.-J. (2011). Hybrid agent-based simulation for policy evaluation of solar power generation systems. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 19(10):2189–2205.
- Zukin, S. e DiMaggio, P. (1990). *Structures of capital: The social organization of the economy*. CUP Archive.

APÊNDICE A – DADOS CLIMATOLÓGICOS

Nesse apêndice são apresentados a temperatura e a irradiação média e as suas variâncias, utilizadas no modelo dessa dissertação. Eles foram construídos com base nos dados horários disponibilizados pelo SIMEPAR da Cidade de Curitiba de janeiro de 2012 a dezembro de 2017.

A.1 TEMPERATURA

Tabela A.1: Apêndice 1 - Temperatura Média Horária de Curitiba com Base nos Dados de Janeiro de 2012 a Dezembro de 2017

Horas (UTC)	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
01	19,08	19,81	18,21	16,76	14,16	12,46	11,93	13,30	14,69	15,64	16,45	18,81
02	18,82	19,60	17,92	16,45	13,88	12,22	11,56	12,89	14,34	15,39	16,20	18,57
03	18,59	19,38	17,68	16,18	13,62	11,97	11,17	12,51	14,03	15,12	15,98	18,36
04	18,37	19,17	17,46	15,90	13,40	11,71	10,85	12,18	13,70	14,91	15,81	18,19
05	18,17	18,98	17,21	15,68	13,21	11,51	10,60	11,84	13,39	14,70	15,65	18,06
06	18,04	18,81	17,02	15,52	13,07	11,33	10,39	11,56	13,22	14,53	15,50	17,90
07	17,97	18,67	16,90	15,40	12,97	11,19	10,22	11,34	13,12	14,43	15,45	17,88
08	18,44	18,87	16,89	15,32	12,92	11,10	10,12	11,18	13,12	14,85	16,18	18,57
09	19,66	20,07	17,90	16,07	13,28	11,30	10,38	11,76	14,16	16,03	17,29	19,68
10	21,06	21,52	19,27	17,40	14,39	12,43	11,96	13,54	15,72	17,44	18,52	20,98
11	22,48	22,95	20,66	18,76	15,72	13,90	13,79	15,55	17,48	18,95	19,75	22,23
12	23,68	24,30	21,90	20,06	17,02	15,30	15,48	17,34	19,07	20,26	20,88	23,35
13	24,62	25,17	22,82	21,09	17,97	16,38	16,70	18,65	20,27	21,27	21,74	24,22
14	25,19	25,81	23,45	21,90	18,75	17,27	17,55	19,69	21,11	22,03	22,29	24,53
15	25,44	26,17	23,82	22,50	19,26	17,94	18,23	20,38	21,70	22,27	22,67	24,81
16	25,40	26,09	23,91	22,69	19,47	18,12	18,50	20,72	22,00	22,20	22,69	24,86
17	24,96	25,60	23,70	22,56	19,32	18,06	18,49	20,69	21,95	21,79	22,24	24,46
18	24,47	24,87	23,06	21,77	18,68	17,56	17,96	20,14	21,26	20,93	21,41	23,73
19	23,48	23,78	22,02	20,36	17,50	16,19	16,53	18,73	19,84	19,69	20,38	22,83
20	22,10	22,40	20,47	18,84	16,29	14,89	14,97	16,92	17,85	18,27	19,01	21,70
21	20,81	21,22	19,48	18,03	15,59	14,19	14,09	15,81	16,67	17,31	17,96	20,53
22	20,08	20,57	19,00	17,56	15,09	13,59	13,36	14,98	15,95	16,79	17,38	19,92
23	19,64	20,23	18,72	17,20	14,71	13,12	12,83	14,28	15,45	16,37	17,01	19,55
24	19,32	19,98	18,44	16,93	14,45	12,76	12,40	13,77	15,06	16,00	16,70	19,26

Fonte: Elaborado a partir dos dados disponibilizado pelo Simepar.

Tabela A.2: Apêndice 2 - Desvio Padrão da Temperatura Horária de Curitiba com Base nos Dados de Janeiro de 2012 a Dezembro de 2017

Horas (UTC)	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
01	2,05	1,86	2,02	2,88	2,54	3,20	3,34	3,04	3,17	2,97	2,31	2,46
02	1,99	1,78	1,98	2,87	2,49	3,24	3,35	2,98	3,11	2,89	2,32	2,40
03	1,98	1,73	1,96	2,92	2,54	3,25	3,34	2,94	3,17	2,79	2,34	2,36
04	1,98	1,70	1,97	2,98	2,64	3,38	3,36	2,93	3,16	2,74	2,38	2,35
05	1,97	1,67	2,00	3,05	2,66	3,48	3,43	2,91	3,15	2,64	2,41	2,30
06	1,95	1,64	2,02	3,05	2,71	3,54	3,46	2,91	3,16	2,64	2,41	2,27
07	1,96	1,61	2,03	3,06	2,75	3,61	3,46	2,90	3,20	2,69	2,41	2,24
08	1,94	1,63	2,07	3,05	2,76	3,68	3,48	2,97	3,19	2,76	2,31	2,30
09	2,21	1,94	2,14	3,09	2,59	3,62	3,40	2,87	3,29	3,13	2,45	2,62
10	2,52	2,32	2,26	3,24	2,40	3,31	3,41	3,29	3,79	3,65	2,75	2,95
11	2,76	2,66	2,52	3,40	2,52	3,43	3,88	3,89	4,35	4,18	3,12	3,18
12	3,00	2,95	2,76	3,58	2,74	3,58	4,13	4,46	4,74	4,55	3,46	3,39
13	3,12	3,20	2,95	3,77	2,94	3,66	4,28	4,75	4,85	4,77	3,67	3,47
14	3,29	3,31	3,13	3,83	3,09	3,70	4,30	4,92	5,02	4,94	3,85	3,55
15	3,50	3,52	3,34	3,87	3,28	3,75	4,41	5,02	5,17	5,08	3,91	3,72
16	3,60	3,80	3,46	3,93	3,35	3,77	4,43	5,12	5,38	5,19	4,03	3,72
17	3,75	4,03	3,56	3,90	3,41	3,83	4,51	5,23	5,41	5,18	4,07	3,89
18	3,77	3,98	3,55	3,92	3,43	3,79	4,52	5,18	5,36	5,06	4,06	3,98
19	3,56	3,63	3,35	3,64	3,11	3,49	4,18	4,91	5,02	4,73	3,85	3,83
20	3,11	3,08	2,87	3,33	2,80	3,27	3,77	4,30	4,39	4,22	3,39	3,48
21	2,60	2,51	2,54	3,18	2,64	3,18	3,55	3,92	4,01	3,82	2,98	3,02
22	2,43	2,28	2,30	3,11	2,52	3,09	3,40	3,63	3,70	3,57	2,71	2,83
23	2,24	2,11	2,18	3,08	2,47	3,07	3,30	3,35	3,45	3,35	2,54	2,65
24	2,11	1,97	2,09	3,05	2,42	3,14	3,31	3,17	3,27	3,10	2,38	2,47

Fonte: Elaborado a partir dos dados disponibilizado pelo SIMEPAR.

A.2 IRRADIAÇÃO

Tabela A.3: Apêndice 3 - Irradiação Média Horária de Curitiba, com Base nos Dados de Janeiro de 2012 a Dezembro de 2017

Horas (UTC)	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
1	0,09	0,19	0,11	0,03	0,01	0,01	0	0	0,03	0,09	0,13	0,14
2	0,06	0,19	0,09	0,02	0,01	0,01	0	0	0,04	0,07	0,12	0,13
3	0,06	0,19	0,08	0,02	0,01	0,01	0	0	0,03	0,07	0,1	0,12
4	0,06	0,18	0,07	0,02	0	0,01	0	0	0,03	0,06	0,09	0,12
5	0,06	0,17	0,06	0,02	0	0,01	0	0	0,02	0,06	0,06	0,12
6	0,06	0,15	0,06	0,02	0	0	0	0	0,02	0,04	0,05	0,12
7	2,87	0,44	0,06	0,02	0	0	0	0	0,07	2,67	9,33	9,9
8	61,76	31,98	13,58	5,2	1,29	0,27	0,24	2,29	16,98	56,58	85,74	86,65
9	193,28	151,46	120,62	79,31	44,84	27,21	30,79	61,2	113,65	174,81	212,51	209,26
10	351,89	314,56	262,34	206,32	142,67	111,27	129,71	192,36	247,97	308,57	345,95	353,34
11	519,98	463,67	396,18	337,2	256,02	213,54	244,63	337,48	396,16	446,13	472,07	472,09
12	651,65	600,31	495,67	439,31	332,17	296,22	325,65	432,93	511,16	550,6	555,84	569,8
13	707,58	628,42	553,29	523,89	396,36	377,27	412,85	537,75	585,29	598,64	602,75	604,04
14	695,86	648,59	558,09	544,57	410,87	400,12	439,23	577,45	600,13	609,95	587,88	574,5
15	627,19	605,77	520,75	508,29	385,41	379,05	406,31	531,89	553,82	526,3	540,35	537,06
16	535,21	503,98	427,37	408,33	319,98	300,1	341,28	448,17	472,72	427,23	458,77	465,95
17	423,21	375,73	340,74	289,19	214,58	202,95	239,54	317,45	343,27	307,08	342,48	344,55
18	300,27	249,24	223,52	149,92	102,53	94,4	121,34	174,54	193,03	180,05	222,28	221,65
19	157,77	120,65	92,7	41	15,81	11,1	22,17	42,27	59,14	66,54	105,22	118,61
20	43,69	27,76	10,04	0,73	0,07	0,12	0,14	0,49	1,34	3,96	14,85	29,01
21	1,39	0,46	0,08	0,11	0,03	0,06	0,06	0,11	0,12	0,13	0,18	0,6
22	0,2	0,23	0,1	0,07	0,03	0,03	0,03	0,05	0,07	0,14	0,17	0,1
23	0,18	0,22	0,11	0,05	0,02	0,02	0,01	0,03	0,05	0,13	0,16	0,12
24	0,12	0,21	0,12	0,04	0,02	0,01	0	0,01	0,04	0,11	0,15	0,14

Fonte: Elaborado a partir dos dados disponibilizado pelo SIMEPAR.

Tabela A.4: Apêndice 4 - Desvio Padrão da Irradiação Horária de Curitiba com Base nos Dados de Janeiro de 2012 a Dezembro de 2017

Horas (UTC)	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
1	0,31	0,44	0,34	0,15	0,13	0,03	0,05	0,02	0,14	0,29	0,37	0,4
2	0,27	0,47	0,3	0,13	0,08	0,02	0,02	0,02	0,18	0,27	0,35	0,38
3	0,26	0,47	0,29	0,11	0,05	0,02	0,01	0,01	0,17	0,27	0,3	0,37
4	0,27	0,44	0,27	0,12	0,03	0,02	0	0,01	0,13	0,24	0,26	0,36
5	0,27	0,44	0,28	0,13	0,02	0,02	0,01	0	0,11	0,23	0,22	0,34
6	0,26	0,42	0,26	0,12	0,02	0,02	0,01	0,01	0,08	0,2	0,21	0,34
7	2,07	0,51	0,27	0,12	0,01	0,02	0	0	0,15	2,92	5,72	6,44
8	35,28	20,18	9,46	3,28	1,17	0,27	0,23	2,4	13,63	40,07	54,23	54,38
9	97,18	80,94	63,3	47,39	29,78	18,82	17,49	38,98	70,52	104,34	123,47	112,78
10	157,87	145,32	121,66	104,39	82,38	71,28	70,66	100,69	133,1	169,24	186,18	175,89
11	222,28	204,77	180,23	168,05	134,08	123,63	122,38	162,74	197,75	230,9	248,79	226,17
12	300,5	250,54	231,35	204,64	174,74	156,31	145,21	198,1	239,99	275,71	286,38	255,27
13	297,13	278,31	260,21	234,38	214,13	200,94	200,22	252,25	275,16	300,07	309,79	269,96
14	298,56	281,51	286,48	246,13	216,09	218,39	207,16	249,65	290,76	304,98	302,78	269,69
15	295,85	267,8	266,57	236,61	209,5	213,23	192,79	226,05	270,99	296,16	273,56	267,55
16	270,78	278,02	236,37	197,6	172,83	169,55	168,73	205,82	228,72	237,54	258,04	239,76
17	266,65	223,39	198,81	146,13	124,4	118,12	117,27	170,49	171,64	194,89	205,6	204,55
18	249,21	161,85	139,82	87,75	66,07	55,13	66,29	96,01	100,66	127,11	134,97	139,87
19	112,92	87,4	61,91	31,08	12,4	7,92	12,91	23,06	35,64	46,82	65,9	79,8
20	29,28	21,23	11,92	0,85	0,24	0,4	0,4	0,54	0,92	2,98	11,06	20,37
21	1,55	0,62	0,25	0,33	0,18	0,25	0,24	0,35	0,36	0,37	0,42	0,71
22	0,48	0,48	0,3	0,27	0,17	0,1	0,14	0,19	0,24	0,41	0,41	0,28
23	0,45	0,46	0,33	0,23	0,16	0,04	0,08	0,09	0,16	0,38	0,4	0,36
24	0,33	0,45	0,35	0,19	0,14	0,03	0,04	0,04	0,16	0,32	0,4	0,41

Fonte: Elaborado a partir dos dados disponibilizado pelo Simepar.

APÊNDICE B – DADOS DO SISTEMA ELÉTRICO

Nesse apêndice são apresentados os dados das barras e das linhas, utilizados na simulação.

B.1 DADOS DAS BARRAS

Tabela B.1: Apêndice 5 - Dados das Barras

$bus_i^{[1]}$	type ^[2]	Pd ^[3]	Qd ^[4]	Gs ^[5]	Bs ^[6]	area ^[7]	Vm ^[8]	Va ^[9]	baseKV ^[10]	zone ^[11]	Vmax ^[12]	Vmin ^[13]
1	3	0	0	0	0	1	1	0	13.8	1	1	1
2	1	100	60	0	0	1	1	0	13.8	1	1.1	0.92
3	1	90	40	0	0	1	1	0	13.8	1	1.1	0.92
4	1	120	80	0	0	1	1	0	13.8	1	1.1	0.92
5	1	60	30	0	0	1	1	0	13.8	1	1.1	0.92
6	1	60	20	0	0	1	1	0	13.8	1	1.1	0.92
7	1	200	100	0	0	1	1	0	13.8	1	1.1	0.92
8	1	200	100	0	0	1	1	0	13.8	1	1.1	0.92
9	1	60	20	0	0	1	1	0	13.8	1	1.1	0.92
10	1	60	20	0	0	1	1	0	13.8	1	1.1	0.92
11	1	45	30	0	0	1	1	0	13.8	1	1.1	0.92
12	1	60	35	0	0	1	1	0	13.8	1	1.1	0.92
13	1	60	35	0	0	1	1	0	13.8	1	1.1	0.92
14	1	120	80	0	0	1	1	0	13.8	1	1.1	0.92
15	1	60	10	0	0	1	1	0	13.8	1	1.1	0.92
16	1	60	20	0	0	1	1	0	13.8	1	1.1	0.92
17	1	60	20	0	0	1	1	0	13.8	1	1.1	0.92
18	1	90	40	0	0	1	1	0	13.8	1	1.1	0.92
19	1	90	40	0	0	1	1	0	13.8	1	1.1	0.92
20	1	90	40	0	0	1	1	0	13.8	1	1.1	0.92
21	1	90	40	0	0	1	1	0	13.8	1	1.1	0.92
22	1	90	40	0	0	1	1	0	13.8	1	1.1	0.92
23	1	90	50	0	0	1	1	0	13.8	1	1.1	0.92
24	1	420	200	0	0	1	1	0	13.8	1	1.1	0.92
25	1	420	200	0	0	1	1	0	13.8	1	1.1	0.92
26	1	60	25	0	0	1	1	0	13.8	1	1.1	0.92
27	1	60	25	0	0	1	1	0	13.8	1	1.1	0.92
28	1	60	20	0	0	1	1	0	13.8	1	1.1	0.92
29	1	120	70	0	0	1	1	0	13.8	1	1.1	0.92
30	1	200	600	0	0	1	1	0	13.8	1	1.1	0.92
31	1	150	70	0	0	1	1	0	13.8	1	1.1	0.92
32	1	210	100	0	0	1	1	0	13.8	1	1.1	0.92
33	1	60	40	0	0	1	1	0	13.8	1	1.1	0.92

Fonte: Adaptado subcommittee1979.

(1) Número da Barra

(2) Tipo da Barra (1 = PQ, 2 = PV, 3 = ref)

(3) Demanda Real de Energia (MW)

(4) Demanda de Potência Reativa (MVar)

(5) Desvio de condutância (MW demandada em $V = 1,0$ p.u.)

(6) Desvio de susceptância (MW injetada em $V = 1,0$ p.u.)

(7) Número de área (número inteiro positivo)

(8) Magnitude da voltagem (p.u.)

(9) Ângulo da voltagem (graus)

(10) Voltagem base

(11) Zona de perda (número inteiro positivo)

(12) Magnitude da voltagem máxima (p.u.)

(13) Magnitude da voltagem mínima (p.u.)

B.2 DADOS DAS LINHAS

Tabela B.2: Apêndice 6 - Dados das linhas

fbus ^[1]	tbus ^[2]	r ^[3]	x ^[4]	b ^[5]	ratio ^[6]	angle ^[7]	status ^[8]	angmin ^[9]	angmax ^[10]
1	2	0.0922	0.0470	0	0	0	1	-360	360
2	3	0.4930	0.2511	0	0	0	1	-360	360
3	4	0.3660	0.1864	0	0	0	1	-360	360
4	5	0.3811	0.1941	0	0	0	1	-360	360
5	6	0.8190	0.7070	0	0	0	1	-360	360
6	7	0.1872	0.6188	0	0	0	1	-360	360
7	8	0.7114	0.2351	0	0	0	1	-360	360
8	9	1.0300	0.7400	0	0	0	1	-360	360
9	10	1.0440	0.7400	0	0	0	1	-360	360
10	11	0.1966	0.0650	0	0	0	1	-360	360
11	12	0.3744	0.1238	0	0	0	1	-360	360
12	13	1.4680	1.1550	0	0	0	1	-360	360
13	14	0.5416	0.7129	0	0	0	1	-360	360
14	15	0.5910	0.5260	0	0	0	1	-360	360
15	16	0.7463	0.5450	0	0	0	1	-360	360
16	17	1.2890	1.7210	0	0	0	1	-360	360
17	18	0.7320	0.5740	0	0	0	1	-360	360
2	19	0.1640	0.1565	0	0	0	1	-360	360
19	20	1.5042	1.3554	0	0	0	1	-360	360
20	21	0.4095	0.4784	0	0	0	1	-360	360
21	22	0.7089	0.9373	0	0	0	1	-360	360
3	23	0.4512	0.3083	0	0	0	1	-360	360
23	24	0.8980	0.7091	0	0	0	1	-360	360
24	25	0.8960	0.7011	0	0	0	1	-360	360
6	26	0.2030	0.1034	0	0	0	1	-360	360
26	27	0.2842	0.1447	0	0	0	1	-360	360
27	28	1.0590	0.9337	0	0	0	1	-360	360
28	29	0.8042	0.7006	0	0	0	1	-360	360
29	30	0.5075	0.2585	0	0	0	1	-360	360
30	31	0.9744	0.9630	0	0	0	1	-360	360
31	32	0.3105	0.3619	0	0	0	1	-360	360
32	33	0.3410	0.5302	0	0	0	1	-360	360
21	8	2.0000	2.0000	0	0	0	0	-360	360
9	15	2.0000	2.0000	0	0	0	0	-360	360
12	22	2.0000	2.0000	0	0	0	0	-360	360
18	33	0.5000	0.5000	0	0	0	0	-360	360
25	29	0.5000	0.5000	0	0	0	0	-360	360

Fonte: Adaptado subcommittee1979.

(1) Barra de origem

(2) Barra fim

(3) Resistência (p.u.)

(4) Reatância (p.u.)

(5) Total de carregamento de susceptância da linha (p.u.)

(6) Relação de transformadores fora da curva nominal

(7) Ângulo de mudança de fase do transformador

(8) Estado de ramificação inicial, 1 = em serviço, 0 = fora de serviço

(9) Diferença mínima de ângulo

(10) Diferença máxima de ângulo